



TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN TOIMIALA

Rakennustekniikka

Talonrakennustekniikka

INSINÖÖRITYÖ

**PAINE-ERON VAIKUTUS ILMAVUOTOKOHDAN
YMPÄRISTÖN PINTALÄMPÖTILAAN**

**Työn tekijä: Markus Immonen
Työn valvoja: Tapani Järvenpää
Työn ohjaaja: Hannu Turunen**

Työ hyväksytty: __. __. 2008

**Tapani Järvenpää
laboratorioinsinööri**

ALKULAUSE

Tämä insinöörityö tehtiin EVTEK-ammattikorkeakoululle. Haluan kiittää kaikkia projektissa mukana olleita saamastani tuesta ja ohjauksesta.

Helsingissä 25.3.2008

Markus Immonen

INSINÖÖRITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä: Markus Immonen	
Työn nimi: Paine-eron vaikutus ilmavuotokohtaan ympäristön pintalämpötilaan	
Päivämäärä: 25.3.2008	Sivumäärä: 54 s. + 1 liitettä
Koulutusohjelma: Rakennustekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Talonrakennustekniikka
Työn valvoja: laboratorioinsinööri Tapani Järvenpää (STADIA)	
Työn ohjaaja: laboratoriopäällikkö Hannu Turunen (EVTEK)	
<p>Tämä insinöörityö tehtiin EVTEK-ammattikorkeakoulun fysiikan laitokselle. EVTEK-ammattikorkeakoulu on kansainvälinen tekniikan, liiketalouden ja kulttuurin alat yhdistävä ammattikorkeakoulu. EVTEK-ammattikorkeakoulun fysiikanlaitos tarjoaa lämpökuvauspalveluja.</p> <p>Insinöörityön tavoitteena oli selvittää, voidaanko pintalämpötilojen muutoksesta eri painesuhteissa tehdä päätelmiä ilmavuodon suuruudesta. Työssä tutkittiin paine-eron vaikutusta rakennuksen vaipan ilmavuotokohtien pintalämpötiloihin. Työssä selvitettiin, kuinka erikokoisten ja -muotoisten ilmavuotokohtien pintalämpötilat käyttäytyvät paine-eroa muutettaessa. Tutkimuksessa selvitettiin, millaisella paine-erolla ilmavuotokohtaan jäähdyttävä vaikutus alkaa näkymään pintalämpötilassa.</p> <p>Työ aloitettiin perehtymällä rakentamismääräyksiin, rakennusfysiikkaan, lämpökuvausnormiin ja kirjalliseen materiaaliin sekä lämpökuvauksella havaittaviin rakennusten yleisiin ilmavuotokohtiin. Tutkimusta varten vuokrattiin TKK:n LVI-tekniikan laboratoriosta tutkimustila. Tilaan rakennettiin tutkimusta varten tarvittavat rakenteet, joihin tehtiin hallitusti rakennusten tyypillisimpiä ilmavuotokohtia.</p> <p>Tutkimuksen tuloksena saatiin tietoa rakenteiden pintalämpötilojen tasaantumisajasta paine-eron muutoksen jälkeen ja havaittiin ilmavuotojen erittäin suuri jäähdyttävä vaikutus rakenteiden pintalämpötiloihin. Rakennuksen vaipan tiiviydellä on erittäin suuri vaikutus rakennuksen energiatalouteen.</p>	
Avainsanat: Lämpökuvaus, ilmavuoto, paine-ero, höyrystyminen, tiiviys, ilmansulun tiiviys	

ABSTRACT

Name: Markus Immonen	
Title: Pressure Difference and its effect on the Surface Temperature Around the Air Leak	
Date: 13.3.2008	Number of pages: 54 p. + 1 attachments
Department: Civil Engineering	Study Programme: Building Engineering
Instructor: laboratory engineer Tapani Järvenpää (STADIA)	
Supervisor: laboratory manager Hannu Turunen (EVTEK)	
<p>This graduate study was carried out for the EVTEK University of Applied Sciences Physics Department. EVTEK University of Applied Sciences is an international institute that combines technology, business, economics and culture. Physics Department of EVTEK offers thermographic survey services.</p> <p>The objective was to determine whether changes in the surface temperature affect different pressure ratios with respect to air leaks. Work included studying pressure differences of the structure covers as well as surface temperature around the air leak spots. The study focused on the differences in size and shape of the air leak spots when pressure-difference was varied. Research also examined how big a pressure-difference shows the cooling effects on the surface temperature.</p> <p>The first part of the study concentrated on Finnish building regulations, physics, thermographic surveys. Also the most common air leaks that can be detected with a thermographic survey were concentrated on. The laboratory owned by Helsinki University of Technology was rented for research. Equipment needed for the research was constructed in the laboratory and it was used to simulate typical air leak spots for buildings.</p> <p>The results of the tests indicated how long it takes for the surface temperature to become steady after changing pressure. The results also indicated how tremendous cooling effects air leaks have on the surface temperature. The structure cover's tightness has a very big effect on the overall energy economics of the building.</p>	
Keywords: thermographic survey, air leak, pressure-difference, vapour barrier tightness, air barrier tightness	

SISÄLLYS

ALKULAUSE

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	1
2	TUTKIMUKSEN TAUSTATIETOA	2
2.1	Aikaisemmat tutkimukset	2
2.2	Tutkimustavoite ja aiheen raja	3
3	TUTKIMUSALUEEN TEORIAA	3
3.1	Rakentamismääräykset ja ohjeet	3
3.1.1	Ilmanvaihto	3
3.1.2	Huoneilman lämpötilat	4
3.1.3	Operatiivinen lämpötila	4
3.1.4	Pintalämpötilat	5
3.1.5	Rakennuksen tiiviys ja ilmanvuotokohdat	7
3.1.6	Painesuhteet	9
3.2	Rakennusten ilmanvaihtojärjestelmät	9
3.2.1	Painovoimainen ilmanvaihto	9
3.2.2	Koneellinen poisto	11
3.2.3	Koneellinen tulo-poisto	12
3.3	Rakennuksen fysiikka; lämpöfysiikka	13
3.4	Rakennuksen fysiikka; kosteus	13
3.4.1	Vesihöyrykosteuden siirtyminen rakenteisiin	13
3.4.2	Konvektio	14
3.4.3	Diffuusio	14
3.4.4	Kondensoituminen	15
3.4.5	Vesihöyrynläpäisevyys ($\text{kg m} / \text{m}^2 \text{sPa}$)	16
3.4.6	Vesihöyrynvastus ($\text{m}^2 \text{sPa} / \text{kg}$)	16
3.5	Rakennuksen ilmanpaineet	16
3.5.1	Painesuhteet, paine-ero	16
3.5.2	Ilmanvuotoluku	17
3.6	Erityyppiset rakenneratkaisut ilmatiiviiden kannalta	17
3.6.1	Rakenteiden ilmatiiviys	17
3.6.2	Muovi	18
3.6.3	Paperi	18
3.6.4	Eri ratkaisujen tyypilliset ongelmakohdat	19
3.6.5	Lämpövuodot ja kylmäsiilat	20
3.7	Lämpökuvaus	20

3.7.1	<i>Lämpökuvaus menetelmänä</i>	21
3.7.2	<i>Miksi lämpökuvaus?</i>	22
3.7.3	<i>Lämpökamera</i>	22
3.7.4	<i>Rakennusten lämpökuvaus</i>	23
3.7.5	<i>Lämpökuvausolosuhteet</i>	25
3.7.6	<i>Keskimääräisen pintalämpötilan määrittäminen</i>	25
3.7.7	<i>Pistemäisen lämpötilan määrittäminen</i>	26
3.7.8	<i>Ilmavuotokohtat lämpökuvauksessa</i>	26
3.7.9	<i>Lämpötilaindeksi</i>	28
3.8	Tutkimusmenetelmät	30
4	TUTKIMUKSEN TOTEUTUS	31
4.1	Tutkittavat rakenteet	31
4.1.1	<i>Seinärakenne</i>	31
4.1.2	<i>Yläpohjarakenteet</i>	35
4.2	Mittauksissa käytetyt laitteet	37
4.3	Laboratoriomittaukset	37
4.3.1	<i>Pintalämpötilan tasaantuminen</i>	38
4.3.2	<i>Pintalämpötilan muutokset eri painesuhteissa</i>	39
5	TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU	40
5.1	Lämpötilan tasaantuminen	40
5.1.1	<i>Paine-eron muutos 0...-20 Pa</i>	40
5.1.2	<i>Paine-eron muutos -20...-30 Pa</i>	42
5.2	Pintalämpötilan muutokset eri painesuhteissa	43
5.2.1	<i>Ilmavuotokohta 1</i>	43
5.2.2	<i>Ilmavuotokohta 2</i>	44
5.2.3	<i>Ilmavuotokohta 3</i>	45
5.2.4	<i>Ilmavuotokohta 4</i>	46
5.2.5	<i>Ilmavuotokohta 5</i>	47
5.3	Ilmavuotokohtien vaikutus lämpötilaindeksiin	48
5.3.1	<i>Ilmavuotokohta 1, lämpötilaindeksi</i>	48
5.3.2	<i>Ilmavuotokohta 2, lämpötilaindeksi</i>	49
5.3.3	<i>Ilmavuotokohta 3, lämpötilaindeksi</i>	49
5.3.4	<i>Ilmavuotokohta 4, lämpötilaindeksi</i>	50
5.3.5	<i>Ilmavuotokohta 5, lämpötilaindeksi</i>	50
6	YHTEENVETO	51
	VIITELUETTELO	54

KÄSITTEISTÖ

Emissiivisyys on pinnan kyky lähettää lämpösäteilyä. Emissiivisyys kertoo kuinka suuri osa kappaleen lähettämästä energiasta on pinnasta lähtevää omaa energiaa. Emissiviteetillä tarkoitetaan pinnan säteilytehon Q_s suhdetta mustan pinnan säteilytehoon Q_m .

Huonelämpötila on ilman lämpötila mitattuna mistä tahansa oleskeluvyöhykkeeltä 1,1 m:n korkeudelta.

Höyrynsulku tarkoittaa ainekerrosta, jonka pääasiallinen tehtävä on estää haitallinen vesihöyryn diffuusio rakenteeseen ja rakenteessa.

Ilmansulku tarkoittaa ainekerrosta, jonka pääasiallinen tehtävä on estää haitallinen ilmavirtaus rakenteen läpi puolelta toiselle.

Kastepiste on pinnan lämpötila, jossa ilman sisältämä vesihöyry tiivistyy pinnalle eli kondensoituu. Se on siten lämpötila, jossa tietyn vesihöyrypitoisuuden sisältämä sisäilman suhteellinen kosteus nousee 100 %:iin.

Kylmäsilta on rakennusosassa oleva, viereisiin aineisiin verrattuna hyvin lämpöä johtava rakenneos, jonka kohdalla lämpö johtuu vaipan läpi paremmin.

Lämpökamera on lämpösäteilyn vastaanotin. Se mittaa kuvauskohteen pinnasta lähtevän lämpösäteilyn eli infrapunasäteilyn voimakkuutta. Lämpökamera muuttaa kohteen lämpösäteilyvoimakkuuden lämpötilatiedoksi, josta lämpökuva muodostuu digitaalisesti.

Lämpötilaindeksi on työkalu, jolla voidaan arvioida rakennuksen vaipan lämpötekniistä toimivuutta. Vaipan pintalämpötiloja voidaan arvioida ja verrata toisiinsa lämpötilaindeksiä käyttämällä silloin, kun lämpötilojen mittauksia ei voida tehdä vakio-olosuhteissa ($-5\text{ }^{\circ}\text{C}$:n ulkolämpötilassa ja $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$:n sisälämpötilassa). Lämpötilaindeksi annetaan prosentin tarkkuudella.

Lämpöviihtyvyyden kokeminen ja alentuneen viihtyvyyden mahdollisesti aiheuttamat terveydelliset vaikutukset ovat yksilöllisiä ja riippuvat monesta tekijästä: sisäilmaolosuhteista, ihmisen terveydentilasta, iästä, herkistymisestä, altistusajasta ja psykologisista tekijöistä. Sisäilmaolosuhteisiin vaikut-

tavat ilmanvaihdon ja lämmitysjärjestelmän lisäksi myös vaipan ilmavuodot ja pintojen lämpötilat.

Normaali käyttötilanne on ne olosuhteet, joissa mitattava tila tavallisesti sitä käytettäessä on.

Oleskeluvyöhyke on se osa huonetilasta, jossa sisäilmastovaatimukset on suunniteltu toteutuvaksi. Yleensä se on vähintään huonetilan osa, jonka alapinta rajoittuu lattiaan, yläpinta on 1,8 m:n korkeudella lattiasta ja sivupinnat 0,6 m:n etäisyydellä seinistä tai vastaavista kiinteistä rakennusosista.

Pintojen keskimääräiset lämpötilat ovat seinien ja lattioiden keskimääräisiä pintalämpötiloja, jotka mitataan standardin SFS 5511 mukaan.

Pistemäinen lämpötila on oleskeluvyöhykkeellä tai sen ulkopuolella mitattu paikallinen lämpötila.

Rakennuksen vaippa tarkoittaa rakennusosia, jotka erottavat lämpimän ja puolilämpimän tilan ulkoilmasta, maaperästä tai lämmittämättömästä tilasta. Vaippaan eivät kuulu puolilämmintä ja lämmintä tilaa toisistaan erottavat rakennusosat.

Tiiviysmittaus tarkoittaa rakennuksen ulkovaipan ilmavuotoluvun n_{50} määrittämistä 50 Pa:n alipaineessa (tai ilmavuotokohtien etsimistä muussa, käyttötilannetta suuremmassa alipaineessa).

Vesihöyryn diffuusio tarkoittaa kaasuseoksessa (esim. ilma) vakiokokonaispaineessa tapahtuvaa vesihöyrymolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksen höyrypitoisuus- tai höyryn osapaine-erot.

Veto on lämpöviihtyvyyteen vaikuttava tekijä, joka aiheutuu ympäristöään kylmemmistä pinnoista ja mahdollisista ilmavuotokohdista rakenteiden läpi. Vedontunteen vaikuttaa ilman liikenopeus ja lämpötila. Veto mitataan tavallisimmin oleskeluvyöhykkeen rajalta 0,6 m ulkoseinästä 0,1 m:n ja 1,1 m:n korkeudelta. Vetomittauksissa mitataan ilman liikenopeus.

1 JOHDANTO

EVTEK-ammattikorkeakoulun fysiikan laitos tarjoaa lämpökuvauspalveluja. Tästä palvelutoiminnasta kertyneitä varoja käytetään tutkimustyöhön ja kehittämään edelleen ko. palvelutoimintaa. Lämpökuvaajat haluaisivat saada apuvälineen käytännön kuvaustilanteisiin, jolla voitaisiin paine-eroa muuttamalla tehdä johtopäätöksiä ilmavuotokohdan suuruudesta.

Lämpökuvauksessa havaittavat rakenteiden pintalämpötilapoikkeamat johtuvat joko eristevirheistä, rakenteellisista kylmäsilloista tai ilmavuodoista. Ilmavuotokohdat voidaan havaita lisäämällä rakennuksen ja ulkoilman välistä paine-eroa. Tällöin pintalämpötila muuttuu.

Paine-eron vaikutuksesta ilmavuotojen ympärillä olevien pintojen lämpötiloihin ei ole aikaisemmin tehty tarkempaa tutkimusta Suomessa eikä Pohjoismaissa. Ei ole tutkittua tietoa, miten pintalämpötila käyttäytyy paine-eron muuttuessa esimerkiksi 0...-20 Pa tai -20...-30 Pa. Tässä tutkimuksessa pyritään selvittämään asiaa tietyssä rakenteessa.

Tutkimuksessa selvitetään rakennuksessa olevien ilmavuotokohtien vaikutusta pintalämpötiloihin. Tutkitaan, miten tietyn kokoinen ja muotoinen ilmavuotokohta käyttäytyy erisuuruissa painesuhteissa. Selvitetään, millaisella paine-erolla ilmavuotokohdan jäähdyttävä vaikutus pintalämpötilaan alkaa näkyä ja kuinka ilmavuotokohdan pintalämpötila käyttäytyy erisuuruissa paine-eroissa. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, voidaanko pintalämpötilojen muutoksista eri paine-eroissa tehdä päätelmiä ilmavuotokohdan "suuruudesta".

2 TUTKIMUKSEN TAUSTATIEDOA

2.1 Aikaisemmat tutkimukset

Paine-eron vaikutuksesta ilmavuotojen ympärillä olevien pintojen lämpötiloihin ei ole aikaisemmin tehty tarkempaa tutkimusta Suomessa eikä Pohjoismaissa. Kirjassa ”Rakennusten lämpökuvaus” on maininta, kappaleessa ”paine-eron vaikutus mittaustuloksiin”, tästä asiasta.

Aihealuetta sivuavia tutkimuksia löytyy useita. Tampereen teknillinen yliopisto on suorittanut mm. seuraavia tutkimuksia:

Kosteusvarma terve pientalo (2002 - 2004). TTY:n Rakennetekniikan yksikkö ja Teknillisen korkeakoulun LVI-tekniikan laboratorio tutkivat vuosina 2002 - 2004 kenttämittauskokeilla sadan puurunkoisen pientalon ja kahden hirsitalon sisäilman kosteus- ja lämpötilaolosuhteita, ilmanvaihdon toimivuutta ja ilmatiiviyttä. Tutkimuksessa mukana olleet kohteet olivat uudehkoja pientaloja, jotka erosivat toisistaan mm. vaipparakenteen, ilmanvaihtojärjestelmän, iän ja rakentamistavan osalta. Tutkimuksen päätavoitteena oli selvittää eri rakenneratkaisujen ja ilmanvaihtojärjestelmien vaikutusta sisäilman laatuun, lämpötila- ja kosteusolosuhteisiin, vaipan ilmatiivyyteen ja talojen energiankulutukseen. Tämän tutkimuksen perusteella ainoastaan 5 % tutkituista taloista alitti Suomen rakentamismääräyksissä suositellun n_{50} -luvun 1,0 1/h. /18./

Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous, AISE (2005 - 2007) Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikan laitos. Suomalaisen pientalojen ja kerrostaloasuntojen ilmanpitävyyttä on tutkittu viimeisen viiden vuoden aikana Tampereen teknillisen yliopiston Rakennetekniikan laitoksen ja Teknillisen korkeakoulun LVI-tekniikan laboratorion kahdessa yhteistyöprojektissa. 100 puurunkoisen pientalon keskiarvo n_{50} -luku oli 3,9 1/h, 10 kevytbetonitalon 1,5 1/h, 10 kevytsoraharkkotalon 3,2 1/h, 10 tiilitalon 2,8 1/h, 10 betoniharkkotalon 1,6 1/h, 10 betonielementtitalon 2,6 1/h ja 19 hirsitalon 5,9 1/h. 20 betonielementtirakenteisen kerrostaloasunnon keskiarvo n_{50} -luku oli 1,6 1/h. 23 kerrostaloasunnon, jossa välipohja oli paikalla valettu, keskiarvo n_{50} -luku oli 0,7 1/h. Puukerrostalon 14 asunnon keskiarvo n_{50} -luku oli 2,6 1/h. /17./

Kuten edellä olevista tutkimuksista nähdään, ilmavuodot ovat edelleen erittäin merkittävä rakennusvirhe. Tutkittavat rakennukset olivat uusia, puurunkoisten pientalojen keski-ikä oli 5 vuotta ja massiivirunkoisten pientalojen 3 vuotta.

2.2 Tutkimustavoite ja aiheen raja

Edellä esitettyjen tutkimusten perusteella monien uusienkin pientalojen ilmatiiviydessä löytyy parantamisen varaa. Ilmavuotokohdat aiheuttavat energiahukkaa ja heikentävät asumusviihtyvyyttä. Lämpökuvauksella voidaan helposti havaita rakenteissa olevat ilmavuotokohdat. Lämpökuvauksen yhteydessä mitataan mm. paine-ero vaipan yli. On selvää, että paine-ero vaikuttaa ilmavuodon suuruuteen mutta siitä ei ole tarkkaa tietoa kuinka paine-ero vaikuttaa ilmavuotokohdan ympäristön pinta-lämpötilaan. Tässä tutkimuksessa selvitetään tätä asiaa.

Tutkimuksen näkökulmana on lämpökuvien tulkinta. Tutkimuksessa ei pyritä tutkimaan tietyn tyyppisen seinärakenteen toimintaa, vaan keskitytään tutkimaan paine-eron vaikutusta ilmavuotokohdan pintalämpötilaan lämpökuvauksen näkökulmasta. Tutkimus suoritetaan vakioituissa sisä- ja ulkolämpötiloissa. Ilmavuotokohtiin oleellisesti liittyviä kosteusongelmia ei pyritä tutkimaan eikä mittaustilanteessa vakioda kosteusolosuhteita. Tutkimusaineistona käytetään laboratoriokokeissa stabiileissa olosuhteissa tietystä seinärakenteesta kerättyä tietoa. Tutkimustuloksia voidaan soveltaa vain tutkittavan tyyppiseen seinärakenteeseen.

3 TUTKIMUSALUEEN TEORIAA

3.1 Rakentamismääräykset ja ohjeet

Kaikessa rakentamisessa on määritelty tietyt vaatimukset ja raja-arvot, joiden puitteissa rakennukset on toteutettava. Tässä on esitetty tutkimusalueeseen keskeisesti kuuluvia rakentamismääräyksiä ja ohjeita.

3.1.1 Ilmanvaihto

Rakennus on suunniteltava ja rakennettava kokonaisuudessaan sillä tavalla, että rakennuksen oleskeluvyöhykkeellä saavutetaan kaikissa tavanomaisissa sääoloissa ja käyttötilanteissa turvallinen, terveellinen ja viihtyisä sisäilmasto /4, s. 3/.

Terveellinen, turvallinen ja viihtyisä sisäilmasto saadaan aikaiseksi käyttämällä rakenteellisia keinoja. Näitä ovat sisäisten kuormitustekijöiden pienentäminen, ulkoisten ja sisäisten kuormitustekijöiden vaikutusten rajoittaminen, sekä ilmanvaihto- ja ilmastointitekniisten keinojen käyttäminen. /4, s. 3./

Huonetiloissa tulee olla ilmanvaihto, jolla käyttöaikana taataan turvallinen, terveellinen ja viihtyisä sisäilman laatu /4, s. 5/.

Rakennus suunnitellaan yleensä ulkoilmaan nähden alipaineiseksi, näin voidaan välttää rakenteiden kosteusvaurioilta sekä mikrobien aiheuttamilta terveyshaitoilta. Alipaine ei kuitenkaan saa olla suurempi kuin 30 Pa. /4, s. 9./

Ilmanvaihtojärjestelmän paineet suunnitellaan ja toteutetaan niin, etteivät sään vaihtelut muuta ilman virtaussuuntia rakennuksessa /4, s. 10/.

3.1.2 Huoneilman lämpötilat

Ihmisen kokemaan lämpöaistimukseen vaikuttavat huoneilman lämpötila, lämpösäteily, ilman virtausnopeus ja ilmankosteus sekä vaatetus ja toiminnan laatu /8, s. 13/.

Ilman lämpötila on lämpötila, joka mitataan mistä tahansa oleskeluvyöhykkeeltä 1,1 metrin korkeudelta. Mittaus voidaan tehdä muualtakin kuin huoneen keskeltä, jos terveyshaitan arviointi sitä edellyttää. /8, s. 14/

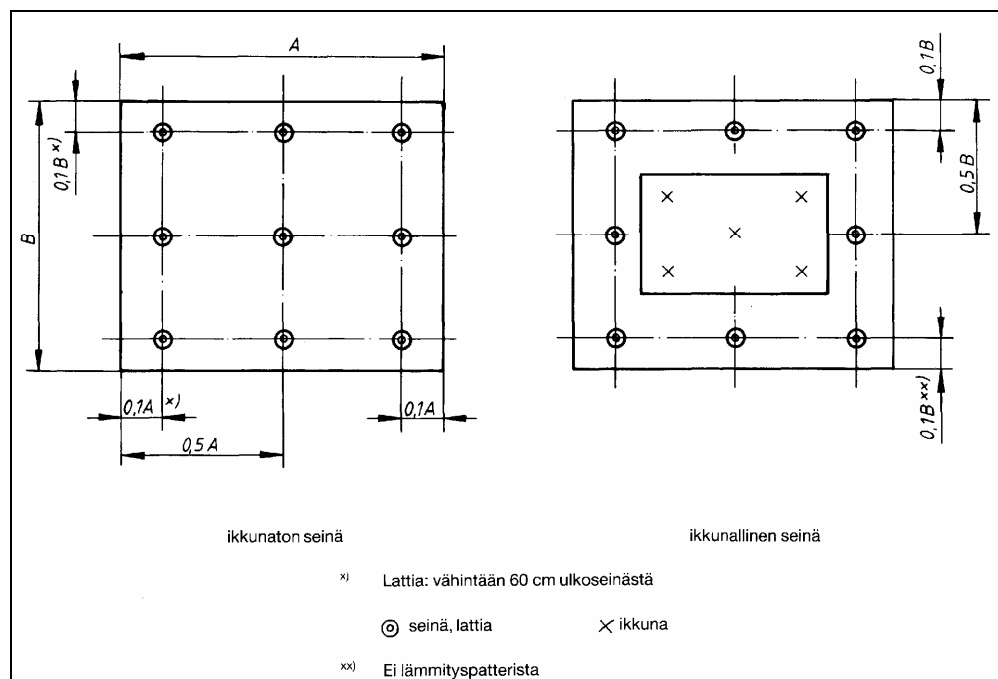
3.1.3 Operatiivinen lämpötila

Operatiivisella lämpötilalla tarkoitetaan huoneen ilmanlämpötilan ja ihmistä ympäröivien pintojen säteilylämpötilojen keskiarvoa. Operatiivinen lämpötila kuvaa huoneilman lämpötilasta poikkeavien pintalämpötilojen vaikutusta ihmisen lämmöntunteeseen. /8, s. 13./

Operatiivinen lämpötila voi poiketa merkittävästi huoneilman lämpötilasta esimerkiksi huoneissa, joissa on suuria ikkunoita tai jos niiden alla on lämmittämättömiä ilmatiloja /8, s. 13/.

3.1.4 Pintalämpötilat

On syytä huomioida, että pintalämpötilojen mittausta koskeva standardi on vuodelta 1989. Mittaustekniikat ovat kehittyneet huomattavasti, joten standardia voidaan pitää osittain vanhentuneena.



Kuva 1. SFS 5511 standardin mukaiset pintalämpötilan mittauspisteet /7, s. 6/.

Paikallisestikin kylmä tai viileä lattiapinta voi aiheuttaa haittaa ihmisten terveydelle ja viihtyisyydelle. Seinä- tai kattopinnan lämpötilasta voi aiheutua haittaa kauttaaltaan viileän pinnan ns. säteilyvedosta tai sisäilman kosteuden tiivistymisestä pistemäisesti kylmään pintaan. /7, s. 5./

Vaikka viileä pinta voi olla hyvinkin pieni, mitataan pintalämpötila koko seinämän alueelta. Pintalämpötila määritellään eri pisteistä mitattujen pintalämpötilojen keskiarvona, mutta myös alin pinnasta mitattu lämpötila kirjataan erikseen mittauspöytäkirjaan. Pintalämpötilan lisäksi myös vuotokohdat voivat olla haitallisia ja ne tulee tarkistaa esimerkiksi savukokein. /7, s. 5./

Seuraavassa on esitetty sosiaali- ja terveysministeriön laatiman asumisterveysohjeen mukaisia lämpötilojen ohjearvoja. Ohjearvot perustuvat mittausolosuhteisiin, joissa ulkoilman lämpötila on -5 °C ja sisäilman lämpötila $+21\text{ °C}$. Jos mittausolosuhteet poikkeavat vertailuolosuhteista (-5 °C , $+21\text{ °C}$), voidaan mitattuja pintalämpötiloja verrata ohjearvoihin jäljempänä esitetyllä tavalla lämpötilaindeksiä käyttäen.

Taulukko 1. Sisäilman lämpötilat /8, s. 17/.

Asunto ja muu oleskelutila	Välttävä taso	TI	Hyvä taso	TI
Huoneilman lämpötila (°C) ¹⁾	18 ^{1) 2)}		21	
Operatiivinen lämpötila (°C)	18 ²⁾		20	
Seinän lämpötila (°C)	16 ⁶⁾	81	18 ⁶⁾	87
Lattian lämpötila (°C)	18 ^{2) 6)}	87	20 ⁶⁾	97
Pistemäinen pintalämpötila (°C)	11 ^{4) 6)}	61	12 ⁶⁾	65
Ilman virtausnopeus ⁵⁾	Vetokäyrä 3		Vetokäyrä 2	

- 1) Huoneilman lämpötila ei saa kohota yli + 26 °C, ellei lämpötilan kohoaminen johdu ulkoilman lämpimyydestä. Lämmityskaudella huoneilman lämpötilan ei tulisi ylittää + 23... + 24 °C.
- 2) Palvelutaloissa, vanhainkodeissa, lasten päivähoitopaikoissa, oppilaitoksissa ja vastaavissa tiloissa huoneilman lämpötilan ja operatiivisen lämpötilan välttävä taso on + 20 °C sekä lattian pintalämpötilan välttävä taso + 19 °C.
- 3) Keskiarvo standardin SFS 5511 (ks. Kuva 1) mukaan määriteltynä, kun ulkoilman lämpötila on - 5 °C ja sisäilman lämpötila + 21 °C. Jos mittausolosuhteet poikkeavat vertailuolosuhteista, käytetään lämpötilaindeksiä (ks. kpl 3.7.9).
- 4) Lämpötilaindeksiä 61 % vastaava pistemäinen lämpötila (ks. luku 3.7.9). Lämpötilaindeksi on laskettu lämpötilaindeksin laskentakaavan mukaan vastaamaan + 9 °C pintalämpötilaa (huoneilman lämpötilaa + 21 °C ja suhteellista kosteutta 45 % vastaava kastepistemälämpötila) kun ulkoilman lämpötila on - 10 °C ja sisäilman lämpötila + 21 °C. Ikkunan, seinän nurkkien ja putkien läpivientien alin hyväksyttävä pistemäinen pintalämpötila.

- 5) Ilman virtausnopeuden enimmäisarvo, joka määräytyy standardin SFS 5511 kuvan 7 vetokäyristä (ks. Kuva 2.).
- 6) Jos huoneilman lämpötila on $< + 21^{\circ}\text{C}$ pintalämpötiloja mitattaessa, seinän ja lattian sekä pistemäisen pintalämpötilan arvioina käytetään mittaus tuloksista laskettua lämpötilaindeksiä, jota verrataan taulukon 1 arvoihin.

3.1.5 Rakennuksen tiiviys ja ilmanvuotokohdat

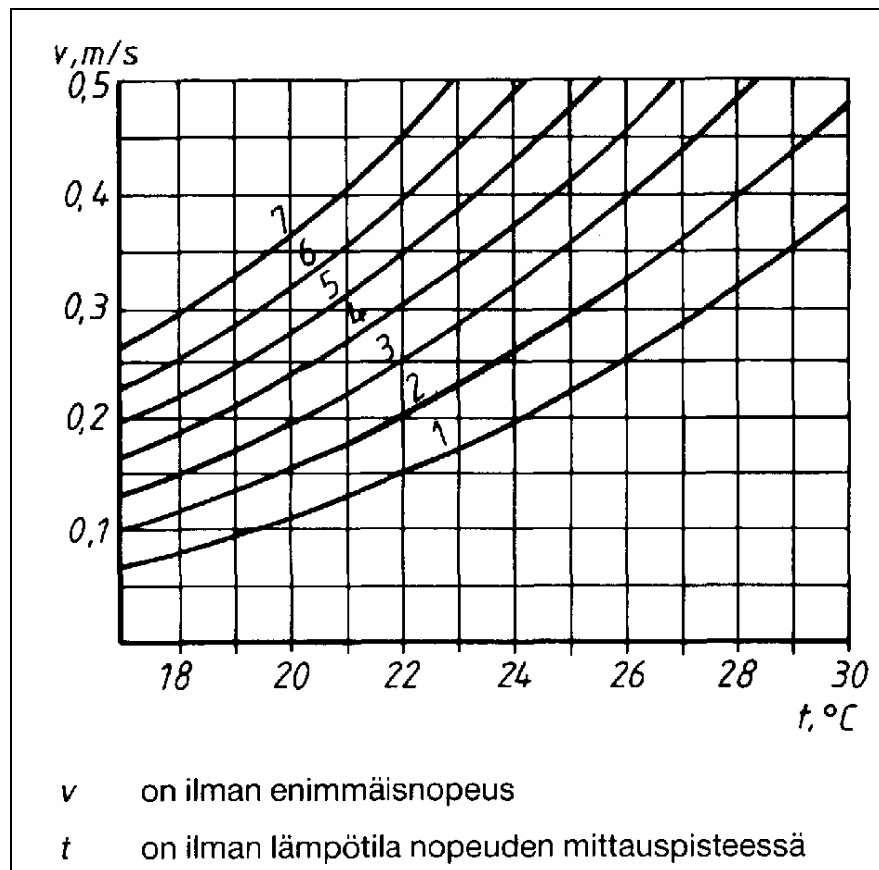
Rakennuksen paineet ja rakenteiden tiiviys suunnitellaan ja toteutetaan siten, että ne vähentävät epäpuhtauksien siirtymistä rakennuksessa /4, s. 9/.

Sisäilman vesihöyryn haitallisen konvektion estämiseksi on rakennuksen vaiipan ja sen yksityiskohtien oltava niin tiiviitä läpikulkevien ilmavuotojen suhteen, että rakennus on mahdollista pitää pääsääntöisesti alipaineisena. Rakennuksen ulkopinnan ja sen yksityiskohtien on estettävä veden ja lumen haitallinen tunkeutuminen rakenteisiin myös tuulen vaikutuksesta. /5, s. 3. /

Ulkoseinän ja sen eri kerrosten sekä ulkoseinään liittyvien rakenteiden ja ulkoseinän liitosten ilmatiiviiden ja vesihöyrynvastuksen on oltava sellainen, että seinän kosteuspitoisuus ei sisäilman vesihöyryn diffuusion tai konvektion vuoksi muodostu haitalliseksi. Sekä rakennuskosteuden että seinään ulko- tai sisäpuolelta satunnaisesti tunkeutuvan veden on voitava poistua vahinkoa ja terveysriskiä aiheuttamatta. /5, s.7./

Seinärakenteen ollessa sellainen, että se voi läpäistä haitallisessa määrin sisäilman vesihöyryä tai ilmaa, varmistetaan seinän höyry- ja ilmatiiviys asentamalla rakenteeseen tarkoituksenmukaisesti kohtiin höyrinsulkuna, ilmansulkuna tai tuulensuojana toimivat ainekerrokset. Avohuokoisen lämmöneristyksen lämpimällä puolella olevan rakennekerroksen vesihöyrynvastuksen on oltava vähintään viisinkertainen verrattuna kylmällä puolella olevan rakennekerroksen vesihöyrynvastukseen. Muussa tapauksessa seinärakenteeseen lisätään erillinen höyrinsulku lämmöneristyksen lämpimälle puolelle. Ilmansulun ja ilmansulkuna toimivan höyrinsulun sekä tuulensuojan saumat ja reunat tulee olla tiiviit ikkunoiden ja ovien karmien kohdalla sekä seinän ala-, väli- ja yläpohjien liittymissä. Ilmansulun lävistykset tuuletusaukkojen, sähkörsioiden, putkien jne. kohdalla on tiivistettävä huolellisesti. /5, s. 7.

Lämpöolot vaikuttavat suoraan viihtyvyyteen. Pitkäaikainen veto ja viileys voivat aiheuttaa terveyshaittaa. Ilman sisältämän kosteuden päästessä tiivistymään pistemäisestäkin rakennuksen kylmään pintaan kosteusvaurioiden mahdollisuus lisääntyy. /8, s. 12./



Kuva 2. SFS 5511 -standardin mukaiset vetokäyrät ilman enimmäisnopeuden määrittämiseksi /7, s. 6 /.

Vedon mittaus olisi hyvä tehdä tuulisella säällä ja mahdollisuuksien mukaan sellaisen tuulen vallitessa, jolloin vedon esiintyminen on todennäköistä. Mittauksia ei tule kuitenkaan tehdä, huomioiden vuodenaika ja paikkakunnan sijainti, poikkeuksellisen kylmänä tai tuulisena aikana (esimerkiksi Etelä-Suomessa mittauksia tulee välttää alle $-26\text{ }^\circ\text{C}$ ulkolämpötilassa). Matalampina hyväksyttävinä lämpötiloina voidaan käyttää julkaisun D2 "Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, määräykset ja ohjeet" taulukon 2.2.2 mitoituslämpötiloja. /8, s. 17./

3.1.6 Painesuhteet

Rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmä on suunniteltava ja säädettävä siten, että rakennus on ulkoilmaan nähden alipaineinen.

Rakennuksen, sen huonetilojen ja ilmanvaihtojärjestelmän paineet suunnitellaan siten, että ilma virtaa puhtaammista tiloista sellaisiin tiloihin, joissa syntyy runsaammin epäpuhtauksia. Paineet eivät saa aiheuttaa rakenteiden pitkäaikaista kosteusrasitusta. /4, s. 9. /

Sisäilmaston, rakenteiden sekä lämmitys- että ilmanvaihtojärjestelmän toiminnan kannalta rakennuksen ilmanpitävyyden tulisi olla lähellä ilmanvuotoluvun arvoa $n_{50} = 1 \text{ 1/h}$ (rakennuksen vaipan läpi virtaa yksi rakennuksen ilmatilavuus tunnissa paine-eron sisä- ja ulkoilman välillä ollessa 50 Pa). /6, s. 3 /. /4, s. 5./

3.2 Rakennusten ilmanvaihtojärjestelmät

Koska paine-ero syntyy ilmanvaihdosta, on erittäin oleellista miten rakennuksen ilmanvaihto toteutetaan. Rakennukset jaetaan kolmeen eri luokkaan ilmanvaihdon kannalta. Jako tapahtuu sen perusteella, miten rakennukseen tuotetaan raitista ilmaa ja millä tavalla jäteilma poistetaan.

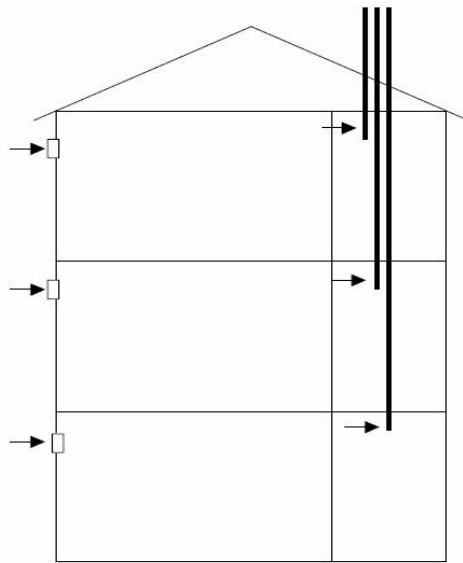
3.2.1 Painovoimainen ilmanvaihto

Painovoimaisella ilmanvaihtojärjestelmällä tarkoitetaan järjestelmää, jonka toiminta perustuu korkeus- ja lämpötilaerojen sekä tuulen aiheuttamiin paine-eroihin. Lämmin sisäilma kevyempänä virtaa poistoilmakanavassa ylöspäin ja ulos rakennuksesta. Tilalle tulee ulkoilmaa sekä ulkoilmalaitteiden kautta että rakenteiden ilmavuotoina. /4, s. 2./ Tätä kutsutaan myös hormieli savupiippuvaikutukseksi ja tuulen ejektorivaikutukseksi /3, s. 27/.

Rakennuksessa, jossa on painovoimainen ilmanvaihto, on siten aina nollataso, jonka yläpuolella rakennus on ulkoilmaan verrattuna ylipaineinen ja alapuolella alipaineinen. Nollatason yläpuolella sisäilma pyrkii tunkeutumaan rakenteen läpi ulospäin ja nollatason alapuolella ulkoilma pyrkii tunkeutumaan ilmanvuotokohtia pitkin sisäänpäin. /3, s. 27./

Painovoimaisen ilmanvaihtojärjestelmän pystykanavat johdetaan yleensä huonekohtaisesti erillisinä vesikaton yläpuolelle. Painovoimaisen ilmanvaihtojärjestelmän ulkoilma- ja jäteilmalaitteen vähimmäiskorkeusero on 4,5 m. /4, s. 10./

Painovoimaisen ilmanvaihdon ongelma on se, että se toimii vain talvella. Kesäolosuhteissa painovoimainen ilmanvaihto saadaan vaihtamaan ilmaa lämmittämällä mahdollisia tulisijoja. Tämä on kuitenkin harvemmin kesäisin tarpeellista.



Kuva 3. Periaatekuva painovoimaisesta ilmanvaihdosta

Toiminta perustuu sisä- ja ulkoilman väliseen paine-eroon:

$$\Delta p = \xi \cdot g \cdot h \cdot \frac{T - T_u}{T_u} \quad \text{Kaava 1}$$

jossa,

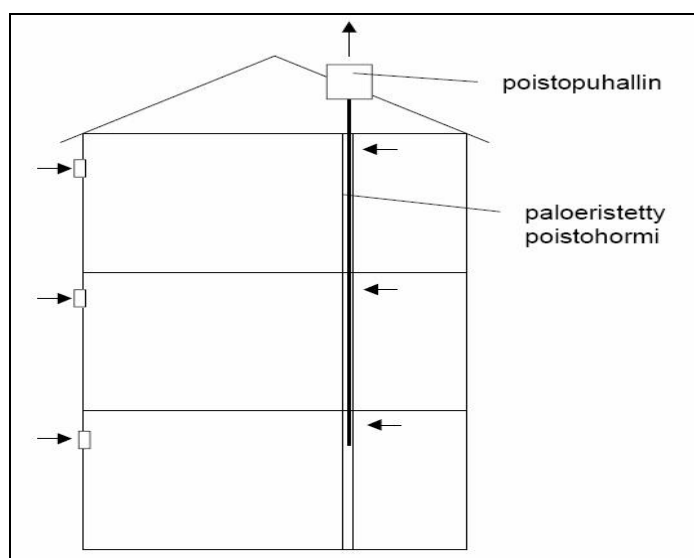
- ρ = ilman tiheys 1,2 kg/m³
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- h = poistohormin korkeus
- T_s = sisälämpötila (K)
- T_u = ulkolämpötila (K)

Painovoimaisen ilmanvaihdon toimintaedellytyksiä ovat riittävä hormin korkeus, lämpötilaero sisä- ja ulkoilman välillä, riittävän väljät korvausilma-

aukot, yhden poistohormin päässä voi olla ainoastaan yksi huone, poistohormit ovat riittävän väljästi mitoitetut kunnossa ja tiiviit sekä virtausvastukseltaan pienet poistoveritit. /2, s. 3./

3.2.2 Koneellinen poisto

Koneellisella poistoilmajärjestelmällä tarkoitetaan järjestelmää, jossa ilma poistetaan rakennuksesta koneellisesti puhaltimen avulla ja tilalle tulee ulkoilmaa sekä ulkoilmalaitteiden kautta että rakenteiden ilmavuotoina /4, s. 2 /. Rakennus on yleensä kauttaaltaan alipaineinen ulkoilmaan nähden /3, s. 27/.

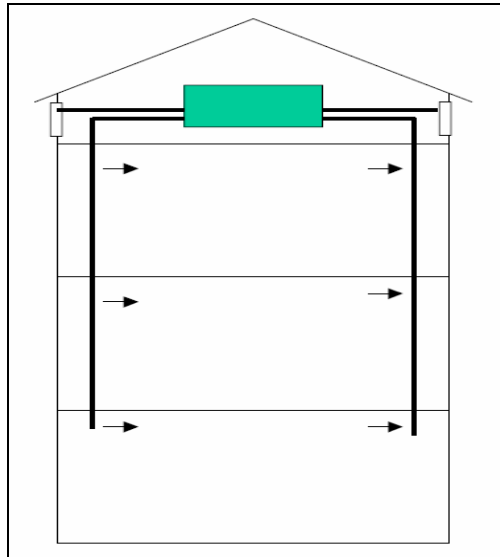


Kuva 4. Periaatekuva koneellisesta poisto-ilmanvaihtojärjestelmästä

Toimiakseen hyvin, koneelliselta poisto-ilmanvaihtojärjestelmältä edellytetään, että poistopuhallin on käynnissä myös yöllä, korvausilmareitit ovat kunnossa (muu kuin postiluukku), korkeapainehäviöiset palonrajoittimina toimivat poistoveritit eikä rakennuksessa ole omalla puhaltimella varustettuja liesituulettimia. /2, s. 4./

3.2.3 Koneellinen tulo-poisto

Koneellisella tulo- ja poistoilmajärjestelmällä tarkoitetaan järjestelmää, jolla ilma poistetaan rakennuksesta koneellisesti puhaltimen avulla ja tilalle tuodaan lämmitettyä/ jäähdytettyä ja suodatettua ulkoilmaa puhaltimen avulla /2, s. 5/. Rakennuksen tulisi olla lievästi alipaineinen ulkoilmaan nähden /3, s. 27/.



Kuva 5. Periaatekuva koneellisesta tulo-poisto ilmanvaihtojärjestelmästä

Tämä ilmanvaihtojärjestelmä edellyttää, että tuloilma on suodatettava. Tulo- ja poistoilmavirrat säädetään siten, että poisto on vähän suurempi, jotta rakennus saadaan hieman alipaineiseksi ulkoilmaan nähden. Tällä torjutaan rakenteiden kosteusvaurioita ja mikrobien aiheuttamia terveyshaittoja. Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto mahdollistaa lämmöntalteenoton rakentamisen. /2, s. 5./

Rakennuksen fysiikka; lämpöfysiikka

Lämpö siirtyy rakenteissa tai tilassa kolmella eri tavalla: johtumalla, säteilemällä ja konvektion eli ilmavirtauksen mukana /13, s. 37/.

Johtumisessa molekyylien liike-energia siirtyy molekyylistä toiseen. Lämpö pyrkii tasoittumaan väliaineessa eli virtaamaan lämpimästä kylmään päin. Lämmön johtumista tapahtuu kiinteissä aineissa ja nesteissä. /13, s. 37./

Säteilyssä jokaisen kappaleen kaikki pinnat, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella, lähettävät eli emittoivat lämpösäteilyä ympäristöönsä. Säteilyn voimakkuus riippuu pintalämpötilasta ja pinnan emissiokerroimesta eli kyvystä lähettää lämpösäteilyä. Pinnan kyky säteillä ja heijastaa lämpöä tulee erottaa toisistaan, sillä heijastuminen tarkoittaa tutkittavan kappaleen pinnasta heijastuvaa ympäristön lämpösäteilyä. Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä. Lämpösäteily poikkeaa muista siirtymistavoista siinä, että se sähkömagneettisena säteilyinä ei tarvitse väliainetta energian siirtämiseen. /13, s. 37./

Konvektiossa eli virtauksessa lämpö siirtyy nesteen tai kaasun virtauksen mukana. Konvektio voi olla pakotettua tai luonnollista. Pakotetussa konvektiossa kaasu tai neste liikkuu jonkin ulkopuolisen voiman vaikutuksesta. Luonnollisessa konvektiossa lämpötilaerojen aiheuttama tiheysero saa aikaan liikkeen. Täysin luonnollista konvektiota esiintyy harvoin. /13, s. 38./

3.3 Rakennuksen fysiikka; kosteus

Meitä ympäröivä ilma ja kaikki huokoiset materiaalit ja rakenteet sisältävät normaalioloissa jonkin verran kosteutta. Kosteuden määrä riippuu materiaalin ominaisuuksista ja ympäröivän ilman lämpötilasta sekä ilman kosteudesta. Rakenteisiin voi joutua ylimääräistä kosteutta myös rakentamisen aikana ja käytön yhteydessä. /13, s. 51./

3.3.1 Vesihöyrykosteuden siirtyminen rakenteisiin

Huone- tai ulkoilman sisältämä kosteus kulkeutuu rakenteisiin joko vesihöyryn osapaine-eron aikaansaaman diffuusion muodossa, jonka suunta on suuremmasta vesihöyryn osapaineesta pienempään tai rakenteen eri puolilla

vallitsevan ilmanpaine-eron aiheuttaman ilmapirtauksen eli konvektion kuljettamana. /13, s. 55./

3.3.2 Konvektio

Vesihöyryn konvektio tarkoittaa ilman sisältämän vesihöyryn siirtymistä ilmapirtauksen mukana. Ilman virtaukset johtuvat ilmanpaine-eroista. Ilma virtaa aina alenevan kokonaispaineen suuntaan. /9./ /13, s. 56./

Kosteutta mukanaan kuljettavaa konvektiovirtausta saattaa esiintyä seinän sisäisenä eli ilman tiheyseroista johtuvana ns. luonnollisena konvektiona tai rakenteessa olevien rakojen ja reikien kautta tapahtuvana ilmanpaine-erojen vaikutuksesta pakotettuna konvektiona. /13, s. 56./

Rakenteiden toiminnan kannalta suurin merkitys kylmänä vuodenaikana on reikien, rakojen, halkeamien yms. läpi sisältä ulos ilmanpaine-erojen vaikutuksesta tapahtuvilla ilmapirtauksilla. Nämä virtaukset voivat kuljettaa mukanaan moninkertaisia kosteusmääriä diffuusion verrattuna. /13, s. 56./

Konvektio yleisesti on lämmön siirtoa kaasussa tai nesteessä lämmön aiheuttamien virtausten mukana. Se aiheutuu lämpötilaerosta, joka aiheuttaa tiheyseroja. Kuuma, harva aine kohoaa painovoimakentässä ylöspäin. Liikellepaneva voima on siis noste. Harva, viilentynyt aine laskeutuu alaspäin. Konvektio on johtumisen ja säteilyn ohella yksi kolmesta primäärisestä lämmönsiirtotavasta. Hellalla lämmitettävässä vesikattilassa voi havaita konvektiota ennen kiehumista, ja varsinkin tätä huomaa silloin, kun kuumentaa vettä lasiastiassa, sillä eri tiheyksisellä vedellä on erilainen taitekerroin, mikä saa aikaan näkyvää veden väreilyä. /9./

3.3.3 Diffuusio

Ilma ei liiku vaan kosteuserot pyrkivät tasoittumaan. Diffuusio on ilmiö, jossa molekyylit pyrkivät siirtymään väkevämmästä pitoisuudesta laimeampaan tasoittaen mahdolliset pitoisuuserot ajan mittaan. Molekyylit liikkuvat satunnaisen lämpöliikkeen eli Brownin liikkeen mukaan.

Vesihöyryn diffuusio on lähinnä rakennustekniikassa käytettävä termi, joka tarkoittaa yleensä kosteuden eli höyrymolekyylien satunnaista liikkumista ilmassa tai huokoisen aineen huokosissa. Diffuusio pyrkii tasoittamaan vesihöyryn osapaineen tai vesihöyrypitoisuuden paikallisia eroja höyryn siirtyes-

sä pienempään pitoisuuteen/ osapaineeseen päin. /9./ Lähes kaikki materiaalit läpäisevät tietyn määrän vesihöyryä.

Yleisimmin diffuusion suunta on lämpimästä kylmään päin. Huomattavin diffuusion suuntaan vaikuttava tekijä on tilojen välillä vallitseva ilman kosteus-ero. Kosteus pyrkii diffundoitumaan erottavan rakenteen läpi tilaan, jonka ilman vesihöyryn osapaine ja yleensä myös absoluuttinen kosteus on pienempi. Jos kylmemmän tilan kosteuspitoisuus on suurempi kuin lämpimämmän tilan, voi diffuusion suunta olla myös kylmästä lämpimään päin. /13, s. 56./

Vesihöyryn kulkeutuessa huokoisten materiaalien läpi on harvoin kyse puhtaasta diffuusiosta. Materiaalin sisällä osa kosteuden liikettä saattaa olla kapillaarista. Jotta estettäisiin vesihöyryn liiallinen kulkeutuminen rakenteisiin ja samalla mahdolliset kosteusvauriot, tulee vaipparakenne suunnitella siten, että lämmöneristeen ja lämpimän tilan väliin tulee riittävän vesihöyryntiivis kerros ja rakenteen vesihöyrynvastus pienenee kylmään tilaan päin mentäessä. /13, s. 56./

3.3.4 Kondensoituminen

Kondensoituminen on ilmiö, jossa ilman sisältämä vesihöyry tiivistyy vedeksi. Tiivistyminen voi tapahtua joko rakenteen pinnassa tai sen sisällä, ilman suhteellisen kosteuden ollessa 100 %. /13, s. 57/.

Rakenteissa vesihöyry tiivistyy aina kovalle pinnalle, joka on kylmempää kuin ympäröivä ilma, jos vesihöyryn kyllästymiskosteus eli kastepiste ylittyy. Tavallisimmin tiivistyvää kosteutta aiheuttavat liian kylmä lämpimään tilaan rajoittuva rakenteen sisäpinta esimerkiksi ikkunalasi, kylmäsillat, höyrysulun puutteellinen tai väärä sijainti ja rakenteen höyrysulussa olevat reiät, jotka mahdollistavat konvektiovirtauksen sisältä ulos. /13, s. 57./

Diffuusion haittavaikutusten estämiseksi tulee rakenteet tehdä lämpimältä puolelta riittävän vesihöyryntiiviiksi ja samalla ne tulee suunnitella siten, että rakenteen vesihöyrynvastus pienenee lämpimästä kylmään päin mentäessä. Rakenteen lämpimällä puolella käytetään yleensä diffuusiotiivistä kerrosta eli höyryn- tai ilmansulkua. Tiivis kerros estää samalla rakenteen läpi tapahtuvat ilmavuodot ja mahdolliset konvektiokosteudesta aiheutuvat kondenssi-

vauriot. Huonetilassa vallitseva alipaine vähentää rakenteisiin kohdistuvaa vesihöyrypainetta ja siten kondensoitumisvaaraa. /13, s. 57./

3.3.5 Vesihöyrynläpäisevyys ($\text{kg m} / \text{m}^2 \text{sPa}$)

Vesihöyrynläpäisevyys kuvaa aineen ominaisuutta päästää läpi vesihöyryä. Diffuusiolaskelmissa oletetaan vesihöyrynläpäisevyys vakioksi. Tosiasiassa vesihöyrynläpäisevyys muuttuu aineen kosteuden muuttuessa. Vesihöyrynläpäisevyys on tietyn paksuisen ainekerroksen ominaisuus. /13, s. 57./

3.3.6 Vesihöyrynvastus ($\text{m}^2 \text{sPa} / \text{kg}$)

Vesihöyryn vastus kuvaa aineen vesihöyryn virtausta vastustavaa ominaisuutta. Se on käänteinen suure vesihöyryn läpäisylle. /13, s. 57./

Määritettäessä diffuusiokosteuden liikkumista ja mahdollista tiivistymistä rakenteissa, täytyy tuntea rakenteiden eri osien lämpötilat, eri ainekerrosten vesihöyrynvastukset, lämpötiloja vastaavat kyllästymispaineet ja suhteellinen kosteus rakenteen molemmilla puolilla. /13, s. 57./

Seinän kosteusteknisessä tarkastelussa oletetaan vesihöyryn osapaineen muuttuvan samassa suhteessa kuin rakenteessa olevien ainekerrosten vesihöyrynvastukset. /13, s. 57./

3.4 Rakennuksen ilmanpaineet

3.4.1 Painesuhteet, paine-ero

Etsittäessä lämpökuvauksella rakennuksen ilmavuotoja, on tärkeää ymmärtää rakennuksen painesuhteet. Rakennuksen painesuhteisiin vaikuttaa ensisijaisesti ilmanvaihtojärjestelmä, tuuli ja savupiippu- eli hormivaikutus. /3, s. 26./

Kylmänä vuodenaikana ulko- ja sisätilojen välisestä lämpötilaerosta aiheutuu luonnollisesti savupiippuvaikutuksesta rakennuksen yläosaan ylipainetta ja alaosaan alipainetta. Savupiippuvaikutuksen aiheuttamaan paine-eroon vaikuttavat rakennuksen korkeus sekä sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero. /3, s. 26./

Painovoimainen ilmanvaihtojärjestelmä perustuu hormivaikutukseen ja tuulen aiheuttamaan ejektorivaikutukseen. Painovoimaisessa rakennuksessa on siis aina nollataso, jonka yläpuolella on ylipaine ja alapuolella alipaine ul-

koilmaan verrattuna. Nollatason yläpuolella sisäilma pyrkii tunkeutumaan rakenteen läpi ulos. Nollatason alapuolella ulkoilma pyrkii tunkeutumaan mahdollisia ilmanvuotokohtia hyväksi käyttäen sisään. /3, s. 27./

Koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä poistoilma johdetaan koneellisesti poistoilmaventtiilien ja poistokanavien kautta ulos. Raitis ilma otetaan suoraan ulkoilmasta ulkoilmaventtiilien kautta. Koko rakennus on alipaineinen ulkoilmaan nähden. /3, s. 27./

Koneellisessa ilmanvaihtojärjestelmässä sekä tulo- että poistoilma vaihdetaan koneellisesti. Järjestelmä voi olla varustettu lämmöntalteenotolla tai ilman sitä. Ilmanvaihto säädetään siten, että rakennus on lievästi alipaineinen ulkoilmaan nähden. Korkeissa tiloissa saattaa rakennuksen yläosa olla silti ylipaineinen. Tyypillisiä esimerkkejä tästä ovat uimahallien hyppytorniosat ja korkeat teollisuusrakennukset. /3, s. 27./

3.4.2 Ilmanvuotoluku

Ilmansulun toimivuutta rakenteessa eli rakenteen tiiviyyttä voidaan mitata koejärjestelyin, jolloin tulokseksi saadaan ilmanvuotoluku. Ilmanvuotoluku kuvaa sitä ilmamäärää, joka vuotaa vaipan rakenteiden läpi yhden tunnin aikana sisä- ja ulkotilojen välisen paine-eron ollessa 50 Pa. Yleensä tiiviys mitataan aiheuttamalla rakennuksen sisälle alipaine. /14./

Alipaine saadaan aikaan puhaltimella, joka asennetaan ulko-oveen tai ikkunaan. ”Vuotokäyrä ajetaan 5-10 Pa:n välein 0- 55 Pa:n välillä. Alipaineen ylläpitämiseksi tarvittava ilmamäärä mitataan.” /3, s. 58./

Alipaineen ylläpitämiseksi tarvittava ilmamäärä jaetaan tutkittavan tilan ilmatilavuudella. Näin saatu ilmavuotoluvun arvo n_{50} [1/h], vaihtoa tunnissa, joka kuvaa ulkovaipan tiiviyyttä. /8, s. 16./

3.5 Erityyppiset rakenneratkaisut ilmatiiviiden kannalta

3.5.1 Rakenteiden ilmatiiviys

Vaipan ilmatiiviys saadaan aikaan yleensä ilmansululla, joita ovat rakennuspaperit ja tervapahvit tai höyrynsululla, joita ovat muovit. Tämä tiivis rakennekerros asennetaan lähelle vaipan sisäpintaa ja sen tarkoituksena on estää kosteuden pääsy rakenteeseen konvektiolla tai diffuusiolla. Tämän kerroksen tarkoituksena on myös hidastaa ilmavirtauksia vaipan läpi, jotka saattai-

sivat aiheuttaa vetoisuutta. Vaipan ulkopinnan tiiviydellä pyritään estämään tuulen ja ilmavirtausten vapaa pääsy ulkopuolelta lämmöneristekerrokseen. Oleellista kokonaisvaltaisen tiiviyn aikaansaamiseksi on saada erityisesti rakenteiden liittymät ja epäjatkuvuuskohdat tiiviiksi. /12, kpl. 10./

Ilmatiiviyn kannalta rakennukset voidaan jakaa karkeasti kolmeen pääryhmään; rakenteet, joissa ei ole erillistä ilmansulkukerrosta, rakenteet, joissa on tiivis höyrysulkukerros ja rakenteet, joissa on ”hengittävä ilmansulkukerros”.

Varsinaista erillistä ilman- tai höyrysulkukalvoa ei käytetä massiivihirsi-, täystiili- eikä betonirakenteisissa rakennuksissa. Myöskään vanhoissa puurakenteisissa rungoltaan rankarakenteisissa rakennuksissa ei ole välttämättä käytetty erillistä ilmansulkukerrosta.

3.5.2 Muovi

Höyrysulkumuovi on STF hyväksytty, polyeteenistä valmistettu, 0,2 mm vahvuinen muovikalvo kosteuden sulkun seinä- ja kattorakenteissa. Höyrysulkumuovi on UV-suojattu ja väriltään sinertävä. /15./



Rakenne, jossa käytetään lämmöneristeenä mineraalivillaa, tarvitsee aina höyrysulkumuovin. Mineraalivilla ei kykene sitomaan huokosrakenteeseensa kosteutta. Muovikalvo toimii sekä ilman- että höyrysulkuna eli se estää ilman virtauksen ja näin myös vesihöyryn konvektion. Muovi myös estää haitallisen vesihöyryn pääsemisen diffuusion avulla rakenteeseen.

3.5.3 Paperi

Rakenteissa, joissa käytetään lämmöneristeenä puukuitueristettä esimerkiksi eko-villa tai selluvilla, jotka ovat käytännössä silputtua paperia, voidaan käyttää muovin sijasta ilmansulkupaperia. Ilmansulkupaperi estää ilmanvirtauksen rakenteeseen. Paperin läpi pääsee kuitenkin diffuusion avulla eristekerrokseen ilmassa olevaa vesihöyryä. Hygroskooppisuutensa ansiosta puukuitueriste pystyy sitomaan huokosrakenteeseensa ilman kosteutta ja luovuttamaan sitä myöhemmin pois. Vaikka käytettäisiin ilmansulkupaperia, tulee rakennus rakentaa niin, että saadaan aikaan ilmatiivis rakenne.

Hygroσκοoppisuus tarkoittaa aineen kykyä sitoa itseensä ilman vesihöyryä ja luovuttaa tätä sitoutunutta kosteutta takaisin ilmaan, kun ilman suhteellinen kosteus muuttuu. Aineiden hygroσκοoppisuutta kuvataan tasapainokosteus- eli sorptiokäyrillä. Käyrä ilmoittaa, kuinka paljon hygroσκοoppisesti sitoutunutta kosteutta aine voi sisältää tasapainotilassa eri suhteellisissa kosteuksissa. /10./

Puu ja puupohjaiset rakennusaineet, kuten esimerkiksi lastulevy, puukuitulevy ja puukuitueriste jne. ovat hygroσκοoppisia /10/.

3.5.4 Eri ratkaisujen tyypilliset ongelmakohdat

Rakenteet, joissa ei käytetä ilman- eikä höyrynsulkua mahdollistavat sen, että sisäilmassa oleva vesihöyry pääsee kulkeutumaan rakenteeseen ja kohdatessaan kastepistelämpötilan tiivistyy vedeksi. Tästä ei ole haittaa, jos materiaalin huokosrakenne on sellainen, että se kykenee sitomaan vesihöyryä itseensä, kuten hirsirakenne, ja myöhemmin taas luovuttamaan sitä takaisin ympäristöönsä.

Betoni materiaalina kykenee sitomaan vettä ja luovuttamaan sitä myöhemmin pois. Ongelmia syntyy silloin, kun sisältä tuleva vesihöyry tiivistyy vedeksi ja jäätyy. Pakkasrapautumista on havaittu lämmöneristeen ja ulomman betonikerroksen liittymäkohdassa, jossa vesi pääsee jäätymään.

Rakenteissa, joissa käytetään höyrynsulkumuovia, ei haitallista kosteutta pääse kulkeutumaan rakenteen sisään. Ongelmat syntyvät silloin, jos muovissa on vuotokohtia. Tiivistämisen kannalta ongelmallisia paikkoja ovat kaikki höyrysulun lävistävät rakenteet ja rakennusosat kuten savupiiput, ilmanvaihtokanavat, vesi- ja viemäriputket sekä sähköputket ja -rasiat. Alasidepuun ja sokkelin välinen liitoskohta on myös osoittautunut erittäin hankalaksi paikaksi ilmatiiviiden kannalta. Rakennuksen ulkoseinien ollessa esimerkiksi betonia, kevytbetonia, täystiiliseiniä tai muuta kiviainesta, joissa ei käytetä höyryn- eikä ilmansulkua, on osoittautunut erittäin vaikeaksi saada puurakenteisen yläpohjan höyrynsulkumuovi liittymään ilmatiiviisti kiviseiniin. Ongelmallisia ovat myös ulkoseinien ja välipohjien liitokset, joissa ulkoseinän höyrynsulku on usein vaikea saada kulkemaan ehjänä liitoskohdan yli. Tämä ongelma on merkittävä ns. 1 ½ krs -pientaloissa, joissa ylemmän kerroksen runko tehdään kehäristikkoja käyttäen.

Ilmansulkupaperi estää kyllä haitallisen ilmavirtauksen rakenteeseen, mutta vesihöyry pääsee paperista diffuusion avulla läpi. Paperia voidaan käyttää vain sellaisten materiaalien kanssa, jotka kykenevät sitomaan vettä huokosrakenteeseensa ja myöhemmin luovuttamaan sitä. Paperi on myös asennettava niin tiiviisti, ettei siihen jää ilmavuotokohtia. Paperin käytössä on samat ongelmakohdat kuin muovin.

3.5.5 Lämpövuodot ja kylmäsillat

Rakenteiden lämpövuodot saattavat vaikuttaa viihtyvyyteen ja rakenteen toimintaan hyvinkin oleellisesti. Lähes aina lämpövuotoihin yhdistyvät kosteusongelmat. Lämpövuotojen on todettu johtuvan esimerkiksi lämpöeristeen puuttumisesta, lämpöeristeen vioista tai niiden huonosta asentamisesta. /12, kpl. 10./

Kylmäsilloiksi kutsutaan suhteellisen pieniä rakenteesta johtuvia vaipan tai eristekerroksen lävistäviä materiaaleja, joiden eristyskyky ei vastaa muun rakenteen eristävyyttä /12, luku 10/.

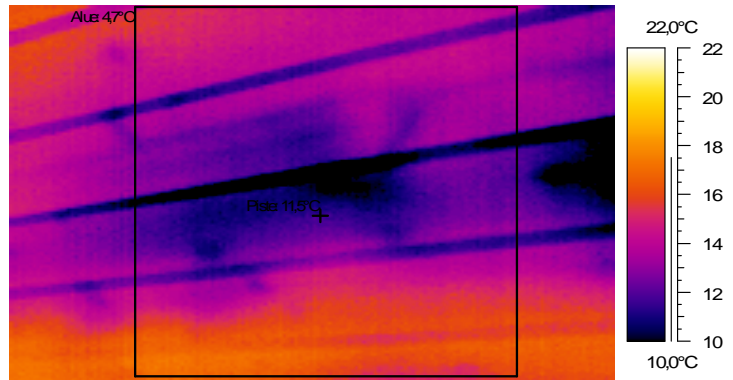
Rakennusvirheet, kuten eristevirheet tai -puutteet, aiheuttavat paikallista pintalämpötilojen laskua. Kastuneet rakenteet aiheuttavat pintalämpötilojen muutoksen verrattaessa rakennetta samantyyppiseen kuivaan rakenteeseen. Kastuneet rakenteet saadaan parhaiten esille lämpötilan muutoksen yhteydessä, koska ne jäähtyvät ja lämpenevät kuivia rakenteita hitaammin. Myös vakiolämpötilanteissa kostea lämmöneriste johtaa lämpöä kuivaa eristettä paremmin. /1, s. 2./

3.6 Lämpökuvaus

Rakennusten lämpökuvausta on harjoitettu Suomessa 1970-luvun lopulta lähtien. Sotilaskäyttöön tarkoitettujen lämpökuvaussovellusten ulkopuolella lämpökuvausta on käytetty lääketieteessä jo 1950-luvulta lähtien ja Ruotsissa aloitettiin rakennusten lämpökuvaus 1960-luvulla. Tämän jälkeen laajimmat käyttömahdollisuudet ovat olleet avaruus- ja lentokoneteollisuuden materiaalitutkimuksissa sekä teollisuuden kunnossapidossa ja laadunvalvonassa. /3, s. 15./

Helsingin kaupungin asuntotuotantotoimisto on käyttänyt jo yli 10 vuotta lämpökuvausta rakennusten laadun tarkkailuun sekä uudis- että korjausrakennuspuolella.

Viime vuosina ovat suurimmat rakennusliikkeet ja osa pienemmistäkin rakennusliikkeistä ottaneet käyttöönsä kaikkien



asuntojen lämpökuvauksen ennen luovuttamista tai ennen vuosikorjauksia. Tarkoituksena on selvittää rakenteiden lämmöneristävyyden toimivuus, laatu ja ilmatiiviys. /3, s. 15./

3.6.1 Lämpökuvaus menetelmänä

Lämpökuvaus on ainetta rikkomaton rakennuksen kunnon- ja laadunarviointimenetelmä, jossa lämpökameran avulla mitataan tutkittavan kohteen pinta-lämpötiloja. Mittaustulokset esitetään lämpökuvana, jossa värejä käyttämällä saadaan näkyville kohteen lämpötilajakauma. Lämpökuvaus on nopea tutkimusmenetelmä, jossa rakenteita tai laitteita purkamatta voidaan analysoida kohteen ominaisuuksia ja kuntoa. Tyypillisiä lämpökuvauksen kohteita ovat mm. kiinteistöt, kaukolämpöverkostot, sähköverkot ja teollisuuden kunnossapito. /11./

Lämpökuvausta voidaan käyttää yhtenä tutkimusmenetelmänä sekä uudisrakennusten laadunvalvonnassa että vanhojen rakennusten kuntotutkimuksissa. /1, s. 1./

Lämpökuvausten luotettavan kuvaustulosten ja tulosten tulkinnan saavuttamiseksi asetetaan kuvaajalle ja kuvien tulkitsijalle vaatimukseksi rakennusfysiikan ja rakenteiden hyvä tuntemus sekä lämpökameran ja sen sovellusohjelmien riittävä tunteminen. /1, s. 1./

3.6.2 Miksi lämpökuvauus?

Lämpökuvauksen tarkoituksena on määrittää rakennusten kunnon- tai laadunvalvonnassa rakennuksen ulkovaipan lämpötekkinen kunto, lämmöneristyskerroksen toimivuus ja rakenteellinen tiiviys eli ilmanpitävyys. Lämpökameran avulla voidaan samalla selvittää muita rakennuksen sekä rakenteiden toimivuuteen, olosuhteisiin ja asumisviihtyvyyteen liittyviä tekijöitä. Näitä ovat esimerkiksi ilmanvirtausreitit, rakenteiden fysikaalinen toiminta, tietyin edellytyksin kosteusvauriot ja LVIS-laitteiden toiminta. /1, s. 2./

Teollisuuden tuotantokatkokset ja tulipalot aiheuttavat vuosittain miljoonien vahingot. Kiinteistöjen putkistovuodot, kosteus- ja homeongelmat ovat jokapäiväinen puheenaihe. Rakenteiden lämpö- ja ilmavuodot laskevat asumisviihtyisyyttä ja lisäävät energiankulutusta. Ongelmat voidaan selvittää asiantuntevan lämpökuvauksen avulla. /11./

3.6.3 Lämpökamera

Lämpökameroita on ollut saatavilla kaupallisilla markkinoilla 1960-luvulta alkaen. Suomessa rakennusten lämpökuvauksista on tehty 1970-luvun lopulta lähtien. /3, s. 11./

Jokainen kappale lähettää sähkömagneettista infrapunasäteilyä, jota ihmissilmä ei havaitse. Lämpökamera on infrapunasäteilyn "vastaanotin", jossa matriisi-ilmaisimen muodostama kuva koodataan lämpötila-alueiksi. Kuvaustuloksia voidaan analysoida monipuolisesti tietokoneella ja tulokset raportoidaan sähköisessä muodossa tai paperille tulostettuna. /11./



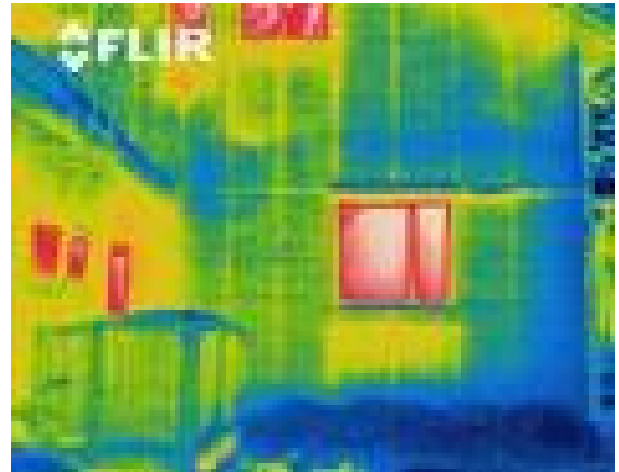
Rakennusten lämpökuvauksessa käytettävän lämpökameran on oltava mittaava ja tasapainotettu sekä kuvantava mittalaite. Tämä tarkoittaa sitä, että kamera muodostaa kuvattavasta kohteesta lämpökuvia, jotka esittävät kohteen pintalämpötilajakauman. Kameran rungon ja ulkoisten olosuhteiden aiheuttamat lämpötilanvaihtelut eivät saa vaikuttaa itse mittaustulokseen ja kameralla voidaan mitata suoraan pintalämpötiloja. /1, s. 3./

Lämpökamerassa tulee olla myös kuvien tallennusmahdollisuus raportoimista, tulosten jälkikäsittelyä ja analysoimista varten. Lämpökameraa, jossa ei ole lämpökuvien analysointi- ja jälkikäsittelyominaisuuksia, voidaan käyttää esimerkiksi rakennustyön aikaiseen laadunvalvontaan. /1, s. 3./

3.6.4 Rakennusten lämpökuvaus

Rakennusten lämpökuvaus tehdään pääasiassa rakennuksen sisäpuolelta. Lisäksi rakennus voidaan kuvata tarvittaessa myös ulkopuolelta sekä lämmöneristyskerroksen kylmältä puolelta niiltä osin kuin se on mahdollista. Rakennuksen ulkopuolisessa kuvauksessa on erityisesti huomioitava edeltäneiden sääolosuhteiden sekä ulkoeristyksen tuuletusraon vaikutukset. /1, s. 4./

Kuvauskohteena olevan rakennuksen tai asunnon koko ulkovaippa kuvataan. Ennen kuin lämpökuvaus aloitetaan, on tarkastettava ja säädettävä kameran asetukset ja kirjattava ylös mittausolosuhteet. Näitä asioita ovat mm. pinnan emissiivisyys, joka yleises-



ti normaaleissa rakennusmateriaaleissa on 0,90 - 0,95, kuvausetäisyys, tutkittavan tilan ilmanlämpötila ja -kosteus sekä ympäristön lämpötila eli kohteesta heijastava lämpötila. /1, s. 4./

Lämpökameran kalibroinnin tarkastus tehdään ennen kuvauksen aloittamista ja sen päätyttyä. Kameralla mitattua lämpötilaa verrataan samasta pisteestä pintakosketusanturilla mitattuun lämpötilaan. /1, s. 4./

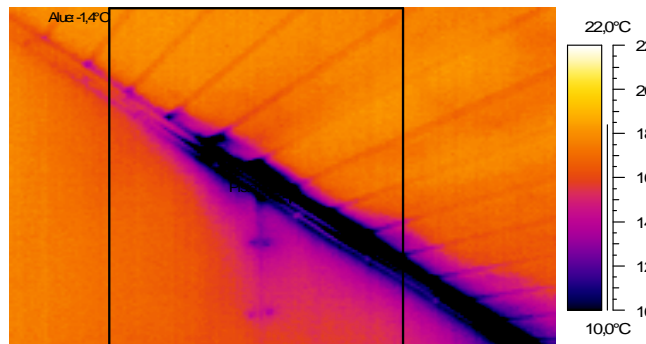
Kuvausetäisyys sisäkuvauksissa on kahdesta neljään metriä ja ulkokuvauksissa alle kymmenen metriä, mikäli se on kuvausolosuhteet huomioiden mahdollista. /1, s. 4./

Lämpökuvia tallennetaan havaituista ympäröivistä rakenteista poikkeavista pintalämpötiloista, jotka eivät täytä 70 % lämpötilaindeksiä tai kun epäillään rakenteen lämpötekniistä toimintaa. Pintalämpötilojen poikkeamat ovat pää-

asiassa vaipassa olevista ilmapuodoista, lämmönerityksen puutteista tai asennusvirheistä sekä kylmäsilloista johtuvia. Poikkeavat kohdat on esitettävä mittausraportissa sekä lämpökuvina että valokuvina. Kuvauspaikat merkitään pohjapiirrokseen kuvan numerolla ja nuolella. /1, s. 4./

Kuvauksessa noudatetaan säännöllisyyttä niin, että esimerkiksi koko rakennus kierretään myötäpäivään ja jokainen erillinen huone tai tila kuvataan myötäpäivään. Kuvaus kohdistetaan pääasiassa rakennuksen ulkovaippaan, mutta myös sisäpintoja voidaan tarvittaessa kuvata esimerkiksi mahdollisten kosteusvaurioiden, kantavien liitoskohtien sekä taloteknisten laitteiden ja varusteiden kunnon ja toiminnan selvittämiseksi. /1, s. 4./

Vaihtamalla kuvauskulmaa voidaan usein mahdollisten heijastusten vaikutukset eliminoida. Kuvattaessa voidaan käyttää ennakolta asetettua minimilämpötilakriteeriä käy-



tetyn lämpötila-asteikon alarajana, jolloin asetetun kriteeriarvon alittavat pintalämpötilat voidaan havaita selkeästi. Tällöin on kuitenkin syytä ottaa huomioon, että kaikkia pieniä lämpötilapoikkeamia ei ehkä välttämättä voida havaita, jos lämpötila-asteikko on kamerassa liian suuri. Tällöin esimerkiksi kosteusvauriotapaukset voivat jäädä huomaamatta. Kuvattaessa voidaan käyttää myös isotermejä, jolloin käytetyn pintalämpötilakriteerin ja valitun lämpötila-asteikon alarajan väliset pintalämpötilat erottuvat selvästi muusta kuvasta. /1, s. 4./

Lämpökuvaus voidaan suorittaa myös kaksivaiheisena, jossa ensimmäinen kuvaus suoritetaan ilmanvaihtojärjestelmän ollessa normaalissa käyttötilassa tai kytkettynä pois päältä. Toinen kuvaus suoritetaan alipaineessa, jonka tulee olla normaalin käyttötilanteen painesuhteita vähintään 20 Pa suurempi, mutta kuitenkin enintään 50 Pa. Tämän mittauksen tarkoituksena on erottaa kylmäsillat ilmapuotokohdista sekä myös paikantaa ilmapuotokohdat. Tätä menetelmää käytetään pääasiassa erityistilanteissa (uimahallit, teollisuusrakennukset ym. poikkeukselliset rakennukset). Pintalämpötilat on kuitenkin määriteltävä aina normaalin käyttötilanteen perusteella. /1, s. 4./

3.6.5 Lämpökuvausolosuhteet

Tarkasteltaessa valmiiden rakenteiden lämpötekniistä toimintaa on olosuhteille määritelty tietyt raja-arvot, jotta mittauksissa saadut tulokset olisivat vertailu- ja käyttökelpoisia. Vähintään kahdentoista tunnin aikana ennen mitausten aloittamista ei ulkolämpötila saa muuttua enemmän kuin $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vähintään kahdentoista tunnin aikana ennen lämpökuvauksen aloittamista sekä kuvauksen aikana ei lämpötilaero vaipan yli saa olla alle $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rakennne ei myöskään saa tänä aikana olla alttiina auringon säteilylle. Lämpökuvausten aikana ei ulkoilman lämpötila saa poiketa enempää kuin $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, eikä sisälämpötila saa poiketa enempää kuin $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ mitattuna lämpökuvauksen aloittamisajankohdasta. Rakennuksen sisätilojen tulee olla alipaineisia ulkoilmaan nähden. /1, s. 3./

Olosuhteista on tarkemmat määräykset Ratu 1213-S -kortissa, joka määrittelee miten rakennusten lämpökuvaus tulee suorittaa.

3.6.6 Keskimääräisen pintalämpötilan määrittäminen

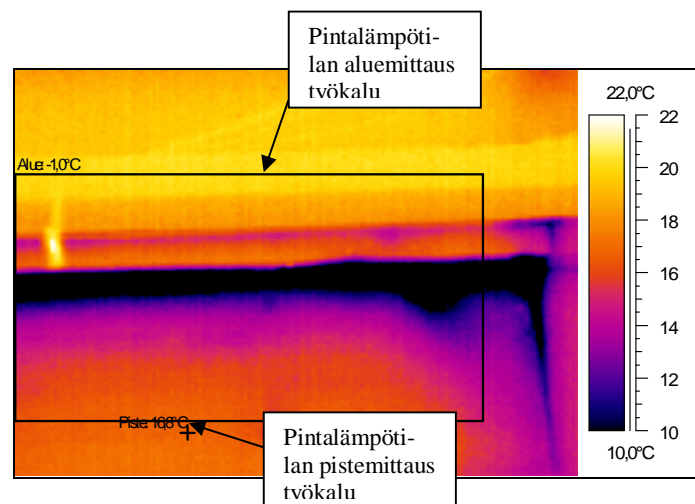
Lattian ja seinän keskimääräisen pintalämpötilan määrittäminen tehdään lämpökameran pistemittaustyökäluä käyttäen standardin SFS 5511 mukaisesti (ks.3.1.4). Lämpötila tulee ilmoittaa $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ tarkkuudella. /1, s. 4./

Pintalämpötiloja mitattaessa on olosuhteiden oltava riittävän vakiintuneita. Ulkolämpötilan suuret vaihtelut ja auringonpaiste ennen mittausta aiheuttavat mittaustuloksiin epävarmuutta. Raskaiden rakenteiden kuten betoni ja tiili, pintalämpötilat muuttuvat hitaammin kuin kevyiden rakenteiden pintalämpötilat. Jos aurinko on paistanut yli kaksi tuntia ennen mittauksia suoraan mitattavaan seinään, on mittausta vältettävä ja mitattava esimerkiksi rakennuksen pohjoispuolen tai varjon puoleinen seinä. Tarvittaessa on mittaus uusittava sopivissa olosuhteissa. Ulkoilman lämpötilan vaihdellessa mittaushetkeä edeltävän vuorokauden aikana enemmän kuin $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ verrattuna mittaushetkellä vallitsevaan lämpötilaan, mittaustulos on kevyiden rakenteiden osalta epävarma ja mittaus tulee uusita suotuisissa olosuhteissa. Mitattaessa raskaita kiviseinärakenteita ulkoilman lämpötilan vaihtelu ei saa ylittää $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$:ta kahden edeltävän vuorokauden aikana mittaushetkellä vallitsevaan ulkolämpötilaan verrattuna. Mittausta edeltävänä aikana on myös sisälämpötilan oltava mahdollisimman vakio. Pinta- ja sisäilman- sekä ulkolämpötiloja

voidaan tarvittaessa seurata kahdesta viiteen päivään jatkuvatoimisella tietojenkeruulaitteella. /8, s. 16./

3.6.7 Pistemäisen lämpötilan määrittäminen

Pistemäinen pintalämpötila mitataan lämpökameralla 2- 4 metrin etäisyydeltä. Mittaustyökaluna käytetään lämpökameran aluetyökalun minimimäärittystä. Mittauksen voi tehdä myös halkaisijaltaan alle 15 mm:n kalibroidulla kosketuslämpötilamittarilla. Lämpötila ilmoitetaan 0,1 °C tarkkuudella. /1, s. 4./



Kuva 6. Lämpökuva

3.6.8 Ilmavuotokohdat lämpökuvauksessa

Rakennusten sisäpinnat eivät ole koskaan tasalämpöisiä. Kaikki havaitut pintalämpötilaerot eivät välttämättä merkitse sitä, että eristeissä tai rakenteissa olisi juuri siinä kohdassa puutteita tai virheitä. Rakenteissa on myös rakenteellisista ominaisuuksista johtuvia niin sanottuja kylmäsiltoja, joista aiheutuu luonnostaan pintalämpötilojen alenemista. Näitä kohtia ovat tyypillisesti ulkonurkat ja lattian rajat. /1, s. 2./

Seinän ja sokkelin/ alapohjan välinen liitos on erittäin tyypillinen ilmanvuoto-kohta. Tämä on suoraa seurausta siitä, että seinän höyrysulku päättyy luonnollisesti tähän kohtaan. Alapohjan ollessa eri materiaali kuin ulkoseinät, esimerkiksi seinän ollessa puuta ja alapohjan betonia, ongelma korostuu entisestään, koska betonialapohjassa ei käytetä erillistä höyryn- tai ilmansulkua. Ongelmallisia ilmatiivyyden kannalta ovat myös rakenteet, joissa yläpohja on puurunkoinen ja ulkoseinät betonia tai muuta kiviainetta. Yläpohjan höyryn-/ ilmansulun liittäminen betoni- tai kiviseinään ilmatiiviisti on erittäin vaikeaa.

Asunnon ilmapuotojen paikallistamiseksi on oleellista tehdä asuntoon koneellisesti riittävä alipaine lämpötilaerojen ollessa vähintään 15 °C. Korvausilman saaminen vapaasti on estettävä. Lämpökameran avulla voidaan hyvin nopeasti paikantaa rakenteiden ilmapuotokohdat. /12, kpl. 10./

Sisäpuolisessa lämpökuvauksessa rakennuksen nurkat, katon ja seinän sekä lattian ja seinän liitokset, kaikki läpiviennit ym. ovat aina jossakin määrin pintalämpötiloiltaan ympäristöään kylmempiä /1, s. 2/.

Kaikki läpiviennit kuten ilmastointiputket, sähköputket ja -kaapelit, savupiiput jne. ovat erittäin tyypillisiä ilmapuotokohtia. Varsinkin savupiipun tiivistäminen höyryn- tai ilmansulun kanssa on erittäin vaikeaa.

Ulkoseinärakenteiden ilmanpitävyys saattaa vaihdella paikoitellen. Tästä on seurauksena, että vuotokohtien läpi kulkeva kylmä ilma jäädyttää rakenteita aiheuttaen vedon tunnetta. Tämä johtuu joko kylmän ilman liikkeen aiheuttamasta vedosta tai kylmentyneiden pintojen aiheuttamasta säteilyvedosta. Rakennuksen ollessa ylipaineinen saattaa myös sisäilmaa kulkeutua ilmapuotokohdista rakenteisiin. Suorittaessa mittauksia rakennuksen ulkopuolelta näkyvät ilmapuotokohdat, kylmäsilat ja eristevirheet ympäröiviä rakenteita lämpimämpänä. /1, s. 2/

Rakennuksen ulkoseinien sekä lattian ja katon liitoskohtien pintalämpötiloihin vaikuttavat rakenteiden ja niiden kunnon lisäksi ilmanvaihtojärjestelmän ja lämmitysjärjestelmän toiminta sekä sääolosuhteet, kuten ulkolämpötila, ulko- ja sisälämpötilan erotus, auringonpaiste, tuulisuus, lämpötilojen muutokset sekä sisäiset kuormat kuten valaistus. Tästä johtuen on mahdotonta yksiselitteisesti määrittää sekä tapauskohtaisesti että yleisesti hyväksyttäviä matalampien pintalämpötilojen arvoja. /1, s. 2/

Käyttämällä erilaisia mittausmenetelmiä voidaan varmentaa rakentamisen laatua ja rakenteiden toimivuutta. Lämpökameralla ja useilla muilla toisiaan tukevilla menetelmillä voidaan arvioida rakennuksen lämpöteknistä toimivuutta sekä valmiissa että rakenteilla olevassa rakennuksessa. Lämpökuvauksella voidaan rakenteita rikkomatta määrittää nopeasti lämpövuotokohdat sekä havaita onko kyseessä mahdollinen eristepuute, ilmapuoto, kylmäsilta ja tietyissä tapauksissa myös kosteusvaurio. /1, s. 2/

3.6.9 Lämpötilaindeksi

Rakennuksen vaipan lämpötekniistä toimivuutta voidaan arvioida lämpötilaindeksillä. Lattian ja seinän pintalämpötiloja arvioidaan lämpötilaindeksin avulla silloin, kun lämpötilojen mittauksia ei voida tehdä $-5\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$:n ulkolämpötilassa eli jos ulkolämpötila on alle -5 °C tai yli -5 °C (maks. $+5\text{ °C}$) mitaustoleranssi huomioiden. /8, s. 14./

Lämpötilaindeksi (TI) määritellään seuraavasti:

$$TI = \frac{(T_{sp} - T_o)}{(T_i - T_o)} * 100[\%] \quad \text{Kaava 2}$$

TI = lämpötilaindeksi

T_{sp} = sisäpinnan lämpötila, °C

T_i = sisäilman lämpötila, °C

T_o = ulkoilman lämpötila, °C

Lämpötilaindeksin laskemiseksi on ensin määritettävä huoneilman, ulkoilman ja tutkittavan sisäpinnan (seinä tai lattia) lämpötilat.

Seinän välttävän tason lämpötilaindeksi on $\geq 81\%$ ja hyvän tason lämpötilaindeksi on $\geq 87\%$. Vastaavasti lattian välttävän tason lämpötilaindeksi on $\geq 87\%$ ja hyvän tason lämpötilaindeksi $\geq 97\%$. Seinän ja ulkovaipan liitoskoh-
tien sekä läpivientien pistemäistä lämpötilaa kuvaava välttävän tason lämpötilaindeksi on $\geq 61\%$ ja hyvän tason $\geq 65\%$. /8, s. 16./

Kun sijoitetaan mitatut suureet edellä mainittuun kaavaan ja ratkaistaan siitä lämpötilaindeksi, voidaan seinän lämpötekniillinen kunto arvioida lämpöviihtyvyyden ja terveydellisen haitan kannalta. /8, s. 16./

Lämpötilaindeksin alittaessa selvästi (kts. Taulukko 1) esitetyn välttävän tason arvon, on syytä tarkistaa tilan painesuhteet ulkoilmaan nähden ja pyrkiä paikallistamaan mahdolliset rakenteissa esiintyvät ilmavuotokohdat ilmanvirtausmittarin tai merkkisavujen avulla /8, s. 16/.

Eristevirheet, rakenteellisista ominaisuuksista johtuvat kylmäsillat, höyryn- tai ilmansulun puutteet ja näistä aiheutuvat ilmavuodot sekä niiden yhdistelmät ovat yleisimmin syynä rakenteiden mataliin pintalämpötiloihin. Ilmanvaihto- ja lämmitysjärjestelmän toiminta vaikuttavat myös pintalämpötiloihin. /8, s. 16./

Asuin- ja oleskelutiloihin voidaan soveltaa seuraavaa korjaustarveluokitusta:

Korjattava kun $TI < 61$ %. Pinnan lämpötila ei täytä sosiaali- ja terveysministeriön laatimaa asumisterveysohjeen välttävää tasoa. Heikentää oleellisesti rakennuksen rakennusfysikaalista toimintaa.

Korjaustarve selvittävä kun TI 61- 65 %. Korjaustarve on erikseen harkittava. Täyttää asumisterveysohjeen välttävän tason, mutta ei täytä hyvää tasoa.

Lisätutkimuksia kun $TI > 65$ %. Täyttää asumisterveydelle asetetut hyvän tason vaatimukset, mutta rakenteissa piilee tilan käyttötarkoitus huomioon ottaen kosteus- ja lämpötekni- sen toiminnan riski. On tarkastettava rakenteen kosteustekninen toiminta tai tehtävä muita lisätutkimuksia esim. kosteusmittaus tai tiiviysmittaus.

Hyvä kun $TI > 70$ %. Täyttää asumisterveysohjeen hyvän tason vaatimukset.

Ei korjaustoimenpiteitä. /1, s. 5./

3.7 Tutkimusmenetelmät

Tutkimus suoritettiin tutustumalla ensin rakennusfysiikan ja lämpökuvauksen kirjalliseen aineistoon, rakennusten ilmatiiviydestä aiemmin tehtyihin tutkimuksiin sekä rakentamismääräyksiin ja ohjeisiin. Varsinaista kenttätutkimusta varten vuokrattiin testaustila TKK:n LVI-tekniikan laboratoriosta, johon rakennettiin tutkittavat seinärakenteet. Rakenteen molemmilla puolilla vakioitiin lämpöolosuhteet (sisällä 21 °C ja ulkona -8,5 °C.). Ilmavuotokohtaan lämpötilaa mitattiin lämpökameralla eri paine-eroissa (0 Pa, -5 Pa, -10 Pa, -15 Pa, -20 Pa, -30 Pa, -40 Pa ja -50 Pa). Tietty paine-ero pidettiin yllä 90 minuuttia. Mittaustuloksista piirrettiin vuotokäyrästä (lämpötila paine-eron funktiona).

Tutkittavana seinärakenteena käytettiin tyypillistä puurunkoisen asuinrakennuksen ulkoseinärakennetta. (13 mm sisäverhouskipsilevy, höyrysulkumuovi, 200 mm mineraalivillaeriste, 9 mm tuulensuojakipsilevy). Seinän höyrysulkuun tehtiin hallitusti kolme ilmavuotokohtaa. Ilmavuotokohta 1 (kts.4.1.1) toteutettiin jättämällä höyrysulkumuovin sauma 300 mm:n matkalta teippaamatta. Tämän lisäksi rakenteeseen tehtiin kaksi samantyyppistä mutta erikokoista ilmavuotokohtaa mahdollisimman kauas toisistaan. Nämä ilmavuotokohdat toteutettiin sähköputken (ilmavuotokohta 2) ja sähkörasian (ilmavuotokohta 3) lävistäessä höyrysulkumuovin. Varsinkin nämä kaksi viimeksi mainittua ovat erittäin yleisiä rakennusvirheitä. Sähkörasioita ja sähköputkien lävistyspaikkoja on asuinrakennuksissa paljon ja näiden liittämisen höyrysulkuun täysin ilmatiiviisti on vaikeaa.

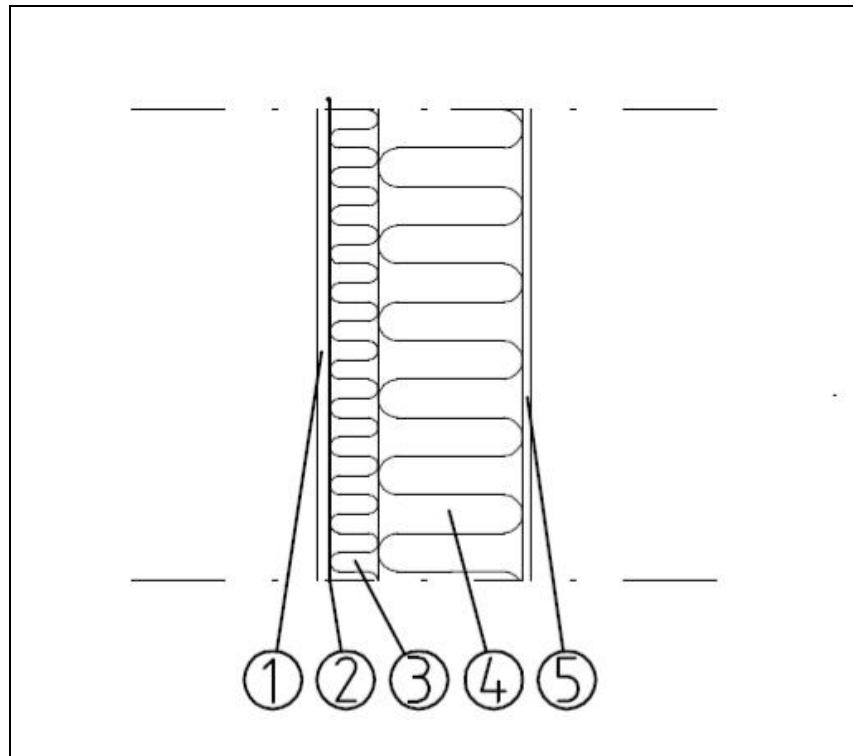
TKK:n tilat mahdollistivat ilmavuodon tutkimisen myös seinän ja katon nurkkarakenteessa (ilmavuotokohta 4), jossa yläpohjan höyrysulkumuovin saumasta on osa teippaamatta sekä rakenteessa, joka kuvaa kivirakenteisen seinän ja puurakenteisen yläpohjan tai kivirakenteisen sokkelin ja puurakenteisen seinän liitosta (ilmavuotokohta 5).

4 TUTKIMUKSEN TOTEUTUS

4.1 Tutkittavat rakenteet

Laboratoriotutkimus suoritettiin teknisen korkeakoulun LVI-tekniikan laboratoriossa. Tutkimusta varten laboratorioon rakennettiin oma seinärakenne sekä käytettiin edellisestä tutkimuksesta jo valmiina olevaa yläpohjarakennetta. Tutkittavat rakenteet ja ilmavuotokohdat pyrittiin tekemään mahdollisimman samanlaisiksi kuin mitä ovat yleiset käytännön rakenteet ja rakenteissa olevat yleisimmät rakennusvirheet.

4.1.1 Seinärakenne

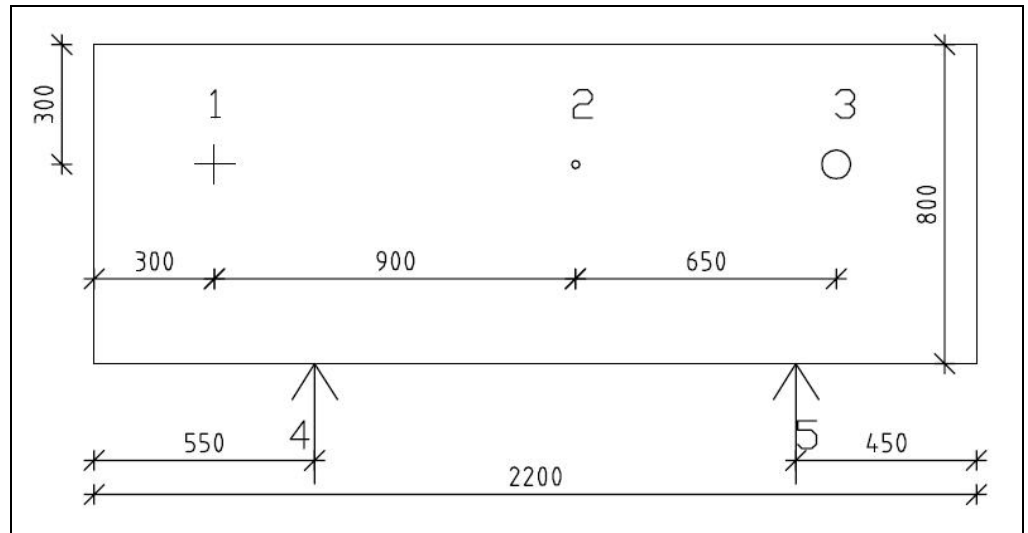


Kuva 7. Tutkittavan seinän rakennekerrokset.

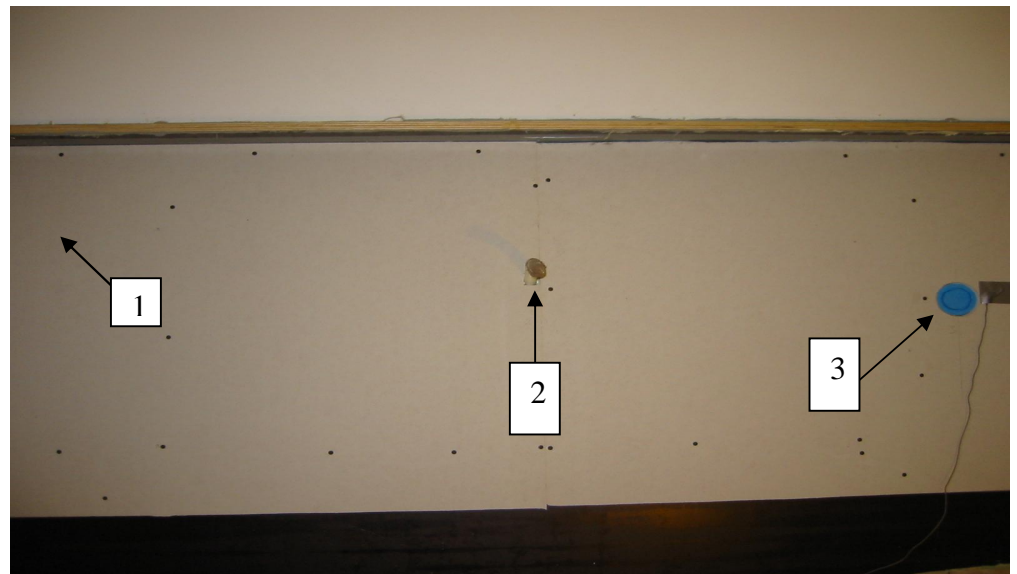
Tutkimusseinän rakennekerrokset ovat:

1. Sisäverhouskipsilevy 13 mm
2. Höyrysulkumuovi
3. Lämmöneriste Parocextra 50 mm + koolaus 50 x 50 k 600
4. Lämmöneriste Parocextra 150 mm + runko 50 x 150 k 600
5. Tuulensuojakipsilevy 9 mm

Tutkittavana ulkoseinärakenteena oli 13 mm sisäverhouskipsilevy, höyrystuskumuovi, 50x50 koolaus + 50 mm mineraalivilla Parocextra, 150x50 kantava puurunko T24 + 150 mm mineraalivilla Parocextra, 9 mm tuulensuojakipsilevy. Seinärakenteen U-arvoksi saatiin 0,24 W / (mK). Tähän seinärakenteeseen toteutettiin kolme ilmavuotokohtaa.

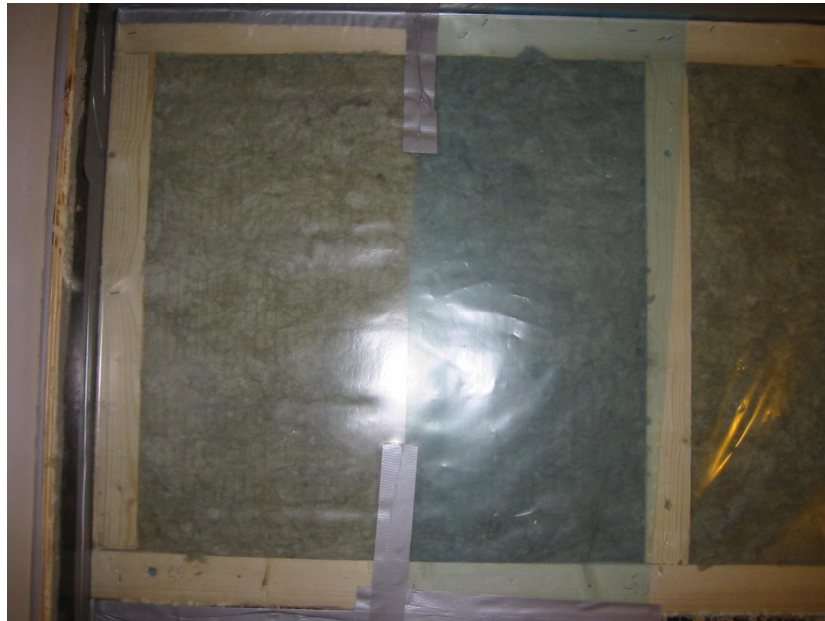


Kuva 8. Kuvassa on näytetty ilmapuotokohdat ja seinärakenteen mitat



Kuva 9. Tutkittava seinärakenne. Ilmavuotokohtat 1, 2 ja 3

Ilmavuotokohta 1. Höyrysulkumuovin sauma runkotolppien välissä jätettiin teippaamatta 300 mm matkalta. Limitys on toteutettu siten, että molempien muovien reunat menevät runkotolpan yli.



Kuva 10. Ilmavuotokohta 1.

Ilmavuotokohta 2. Höyrysulun lävistää halkaisijaltaan 20 mm muovinen sähköputki. Lävistyskohta on jätetty teippaamatta.



Kuva 11. Ilmavuotokohta 2.

Ilmavuotokohta 3. Höyrysulun lävistää halkaisijaltaan 72 mm sähkörasia. Höyrysulkumuovin lävistys on tehty mahdollisimman siististi, mutta lävistyskohta on jätetty teippaamatta.

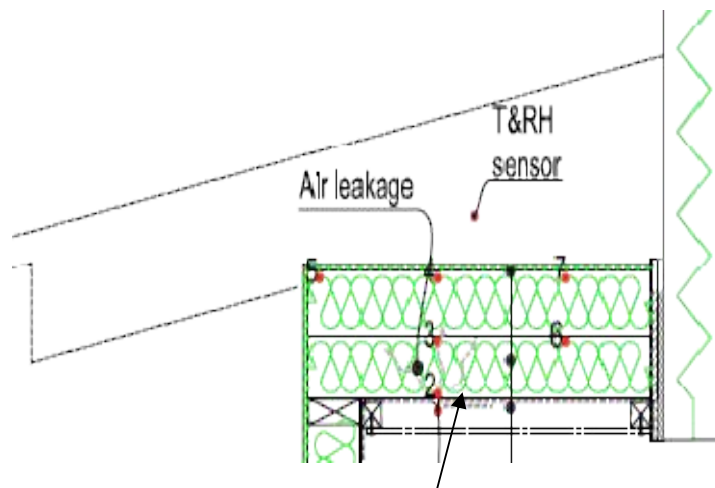


Kuva 12. Ilmavuotokohta 3.

4.1.2 Yläpohjarakenteet

Tutkittavien yläpohjien rakenteena oli 13 mm sisäverhouskipsilevy, 50x50 koolaus k 300, höyrysulkumuovi, Parocextra mineraalivilla 200 mm, Paroc WAS 25t 50 mm tyvek-pintaista tuulensuojalevyä. Toinen yläpohjarakenteista oli liitetty puu- ja toinen siporex-seinään.

Ilmavuotokohta 4. Yläpohjarakenteen höyrysulkumuoviin on tehty 200 mm viilto 150 mm päähän ulkoseinän ja yläpohjan liitoskohdasta, keskelle yläpohjan alapinnan koolausväliä.

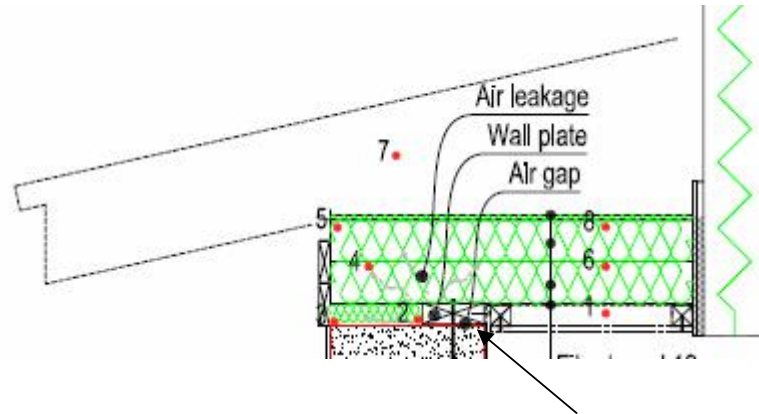


Kuva 13. Ilmavuotokohta 4. Höyrysulussa on 200 mm pitkä viilto nuolen osoittamassa kohdassa. /16./



Kuva 14. Ilmavuotokohta 4. Nuolen osoittamassa kohdassa höyrysulkumuovin liitos on jätetty teippaamatta.

Ilmavuotokohta 5. Yläpohjarakenteen ja siporex-seinän liitos. Yläpohjan höyrysulkumuovi päättyy yläsidepuun kylkeen eikä jatku yläsidepuu- ja kivirakenteisen seinän liitoskohdassa yli. Tämä rakenne voi myös kuvata puurakenteisen seinän ja kivirakenteisen sokkelin liitosta.



Kuva 15. Ilmavuotokohta 5 nuolen osoittamassa kohdassa. /16./



Kuva 16. Ilmavuotokohta 5. Yläpohjan höyrysulkumuovi päättyy kuvassa näkyvään teippiin. Rakenteiden liitoskohta on heti teipin vieressä nuolen osoittamassa kohdassa.

4.2 Mittauksissa käytetyt laitteet

Lämpökuvaukset suoritettiin ThermaCam B2-kameralla. Paine-eroa muutettiin Intelecsa C5-säätimellä, jolla muutettiin poistomurille tulevaa jännitteen suuruutta. Sisälämpötilaa mitattiin ja säädettiin TOHO ttm-004-laitteella. Lämpötila ja paine-ero mitattiin ja taltioitiin Grant 1200 serves type 1202-lokkerilla. Lämpötila- ja paine-eromittarina käytettiin lisäksi Velochi lach plus mittaria. Ilmavuotokohdat ja rakenteet valokuvattiin digitaalikameralla.



Kuva 17. ThermaCam B2-lämpökamera

4.3 Laboratoriomittaukset

Ilmavuotokohtien lämpökuvaukset suoritettiin 1- 1,5 m etäisyydeltä tutkittavasta kohdasta ThermaCam B2-lämpökameralla. Emissiivisyytenä käytettiin 0,95 arvoa. Tutkimushuoneen sisälämpötila mitattiin oleskeluvyöhykkeeltä 1,1 metrin korkeudelta datalokkerilla ja Velochi lach plus-elektronisella lämpötilamittarilla. Ulkolämpötila mitattiin rakenteen välittömästä läheisyydestä datalokkerilla. Paine-ero rakenteen yli mitattiin sekä datalokkerilla että Velochi lach plus-elektronisella paine-eromittarilla. Rakenteen pintalämpötila mitattiin SFS 5511 -standardin mukaisesti lämpökameran pistemittaustyökälulla. Pintalämpötilat mitattiin myös datalokkerin pintalämpötila-anturilla yläpohja- ja seinärakenteesta.

Laboratoriomittaukset suoritettiin kolmena päivänä. Laboratorioon oli saatettu vakioidut olosuhteet yli 12 tuntia ennen mittausten aloittamista, sisälämpötila 21 °C ja ulkolämpötila -8,5 °C. Ensimmäisenä mittauspäivänä mitattiin paine-eron muutoksesta johtuva rakenteiden pintalämpötilojen muutoksen tasaantumiseen kuluva aika. Kokeisiin perustuva suositus pintalämpötilojen tasaantumisajalle on puoli tuntia. Tasaantumisaikamittauksen tarkoituksena oli tarkastaa, riittääkö tämä suositusaika.

Toisena mittauspäivänä mitattiin pintalämpötilan muuttuminen paine-eron vaikutuksesta -5...-10 Pa, -10...-15 Pa, -15...-20 Pa ja -20...-30 Pa paine-erojen muutoksille. Kolmantena mittauspäivänä mitattiin -30...-40 Pa ja -40...-50 Pa paine-erojen muutoksille. Pintalämpötilan muutoksesta otettiin lämpökuvat kymmenen minuutin välein yhdeksänsäksentoista minuuttiin asti jokaisesta ilmavuotokohdasta jokaisessa paine-eron muutoksessa.

Datalokkeriin tallentui paine-ero, sisä- ja ulkoilman lämpötilat sekä seinä- ja yläpohjarakenteen pintalämpötilat minuutin välein siitä alkaen kun olosuhteet oli laitettu päälle. Arvojen rekisteröinti mittausten aikana tapahtui puolen minuutin välein.

Lämpökuvauksesta tehtiin mittauspöytäkirjaa, johon merkittiin ilmavuotokohta, paine-ero, kuvausaika, kuvassa näkyvä minimilämpötila ja kuvan numero.

Kaikki mittaustulokset, sekä lämpökuvauuspöytäkirja että datalokkerin tallentama tieto, ovat tallennettu Excel-tiedostona.

4.3.1 *Pintalämpötilan tasaantuminen*

Tasaantumismittaus aloitettiin 0 Pa paine-erosta, sisälämpötilan ollessa 21 °C ja ulkolämpötila -8,5 °C. Lämpötilat pidettiin vakiona kaikissa paine-eroissa. Kaikki viisi ilmavuotokohtaa kuvattiin lämpökameralla tässä tilanteessa.

Tämän jälkeen paine-ero muutettiin -20 Pa: iin ja ilmavuotokohdat kuvattiin ensin kymmenen minuutin jälkeen paine-eron muuttamisesta ja tämän jälkeen kahdenkymmenen minuutin välein viimeiseen kahdeksänsäksentoista minuutin kohdalla tapahtuneeseen kuvaukseen asti. Näin pitkällä kuvausjaksolla pyrittiin varmistamaan ilmavuotokohdan pintalämpötilan muutoksen tasaantuminen.

Kun pintalämpötilat olivat tasaantuneet, muutettiin paine-ero -20 Pa:sta -30 Pa: iin. Tässä paine-erossa kuvattiin ilmapuotokohdat viidentoista minuutin välein seitsemäänkymmeneenviiteen minuuttiin asti.

Tämän mittauksen tarkoituksena oli varmistaa, että varsinaisessa kokeessa käytettävä tasaantumisaika paine-eron muuttamisen jälkeen on riittävä. Tasaantumismittauksella pyrittiin myös saamaan lämpökuvaajille tietoa käytännön mittaustilanteita varten. Tätä tarvitaan niissä mittauksissa, joissa suoritetaan kaksivaiheista lämpökuvausta.

4.3.2 *Pintalämpötilan muutokset eri painesuhteissa*

Pintalämpötilojen muutosten mittaaminen eri painesuhteissa aloitettiin -5 Pa paine-erosta, sisälämpötilan ollessa 21 °C ja ulkolämpötilan -8,5 °C. Lämpötilat pidettiin vakioina koko mittausten ajan. Nämä aloitusolosuhteet oli pidetty stabiileina yli kahdentoista tunnin ajan ennen mittausten aloittamista.

Tämän aloituspaine-eron voidaan olettaa kuvaavan tilannetta, jossa lämpökuvaaja menee kuvaamaan esimerkiksi asuintaloa, missä rakentamismääräysten mukaan on ilmanvaihto oltava jatkuvasti toiminnassa.

Kaikki viisi ilmapuotokohtaa kuvattiin lämpökameralla kymmenen minuutin välein kussakin painesuhteessa yhdeksäänkymmeneen minuuttiin asti. Mittaukset suoritettiin seitsemässä eri paine-erossa. Nämä paine-erot olivat aloituspaine-ero -5 Pa sekä -10 Pa, -15 Pa, -20 Pa, -30 Pa, -40 Pa ja -50 Pa.

5 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

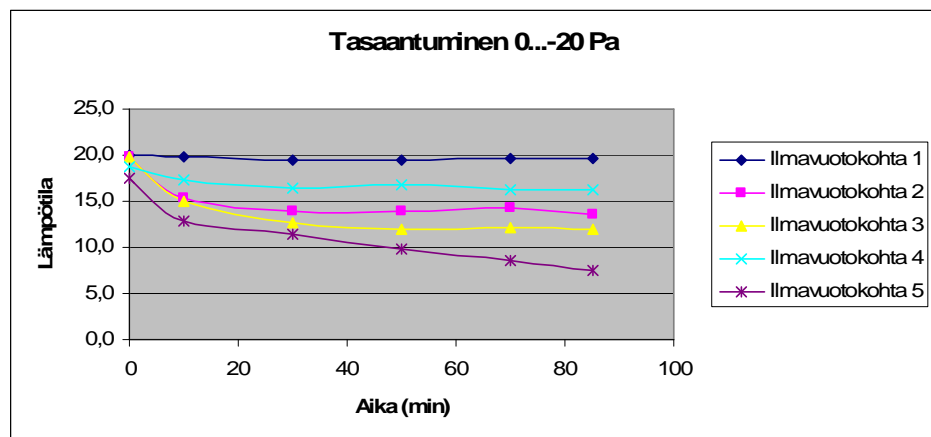
Tutkittavien rakenteiden ilmavuotokohdista otettiin 295 lämpökuvaa. Kuvat analysoitiin ThermaCam Reporter 2000 -ohjelmalla. Lämpökuvista analysoitiin ilmavuotokohdan pintalämpötila, rakenteen keskimääräinen lämpötila ja ilmavuotokohdan lämpötilaindeksi.

5.1 Lämpötilan tasaantuminen

Saatujen mittaustulosten perusteella näyttää siltä, että suositeltavaa olisi käyttää pidempää kuin puolen tunnin tasaantumisaikaa. Nopeinta tasaantumista näyttäisi olevan pistemäisissä suoraan höyrysulun ja pintarakenteen lävistävissä ilmavuototapauksissa (ilmavuotokohdat 2 ja 3). Yläpohjarakenteessa, jossa pintamateriaalin ja höyrysulkumuovin välissä on ilmatila, eikä pintalevyssä ole reikää, kestää tasaantuminen pidempään (ilmavuotokohta 4).

Pintalämpötilojen muuttuminen on suurinta 0...-20 Pa:n paine-eron muutoksen aikana. Paine-eron lisääminen kymmenellä Pa:lla -20...-30 Pa:n ei viilennä pintalämpötiloja enää niin merkittävästi. Tasaantumisajoissa ei ole merkittäviä eroja näiden painesuhteiden välillä.

5.1.1 Paine-eron muutos 0...-20 Pa



Kuva 18. Kuvaajasta nähdään kaikkien ilmavuotokohtien pintalämpötilojen tasaantumisaika paine-eron muutoksen 0...-20 Pa jälkeen.

Ilmavuotokohdan 1 kuvaajasta voidaan nähdä, että pintalämpötila ei muutu oleellisesti. Kun höyrysulkumuovin jatkoskohdan molemmat reunat on limitetty rakentamismääräysten mukaisesti runkotolpan yli, voidaan tämän tut-

kimuksen perusteella todeta, että vaikka osa saumasta jäisi teippaamatta, ei haitallista ilmavuotoa pääse syntymään. Pintalämpötila säilyy hieman alle kahdessakymmenessä asteessa.

Ilmavuotokohdan 2 kuvaajasta nähdään, että lämpötila putoaa nopeasti lähelle sitä tasoa, johon se tässä paine-erossa vakiintuu. Kolmenkymmenen minuutin kohdalla voidaan todeta tasaantumisen tapahtuneen eikä lämpötila enää muutu. Kyseessä on pieni reikä höyrysulkumuovissa, joka lävistää myös pintamateriaalin sekä on suorassa kosketuksessa pintamateriaalin kanssa. Tästä syystä lämpötilan tasaantuminen tapahtuu nopeasti. Tämän tyyppisen ilmavuodon pintalämpötila alenee myös nopeasti. Pintalämpötila muuttuu 19,9 °C:sta 13,6 °C:een.

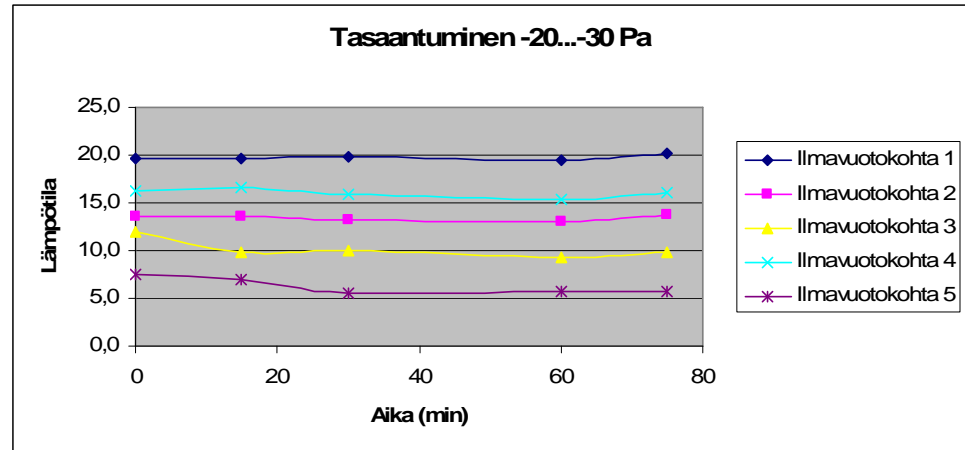
Ilmavuotokohdan 3 kuvaajasta voidaan myös nähdä, että lämpötila putoaa nopeasti lähelle vakiintumistasoa. Lopullinen tasaantuminen kestää hieman kauemmin kuin edellisessä tapauksessa. Tasaantuminen tapahtuu kuitenkin alle tunnissa, noin viidenkymmenen minuutin kohdalla. Höyrysulun ilmavuotokohta lävistää pintamateriaalin ja on myös suorassa kosketuksessa tähän, mutta reikä on huomattavasti suurempi kuin edellisessä tapauksessa. Pidempi tasaantumisaika ja suurempi pintalämpötilan muutos johtuneet tästä. Pintalämpötila alenee hieman enemmän kuin edellisessä ilmavuotokohdassa 19,8 °C:sta 12,0 °C:een.

Ilmavuotokohdan 4 kuvaajan perusteella pintalämpötilan muutos tapahtuu melko hitaasti ja tasaisesti. Kyseessä on yläpohjarakenne, jossa höyrysulkumuovin ja pintamateriaalin välissä on ilmatila eikä pintamateriaalissa ole reikää. Ilmavuotokohdan ilmavirtaus ei pääse jäädyttämään suoraan sisäpintaa, vaan virtaava kylmä ilma jäädyttää ensin ilmatilan ja tämän jälkeen pintamateriaali jäähtyy johtumalla. Voidaan myös olettaa, että tässä tapauksessa ilman virtaus on vähäisempää kuin tapauksissa, joissa on suora reikä höyrysulun ilmavuotokohtaan. Tämä selittää sen, että lämpötilan aleneminen on vähäisempää kuin ilmavuotokohdissa 2, 3 ja 5. Rakenteen sisäpinta jäähtyy myös muita vähemmän, pintalämpötilan laskiessa 18,7 °C:sta 16,3 °C:een. Tasaantumisaika on noin seitsemänkymmentä minuuttia.

Ilmavuotokohdan 5 reiän muoto on pitkä ja kapea. Tämä on erittäin yleinen ilmavuototyyppi käytännön rakennuksissa. Kuvaajasta näemme, että pintalämpötila muuttuu aluksi nopeasti, mutta tasaantumisaika on pitkä. Pinta-

lämpötila muuttuu eniten kaikkiin muihin ilmavuotokohtiin verrattuna 17,5 °C:sta 7,5 °C:een. Kuvaajasta on myös nähtävissä, että pintalämpötila muuttuu koko yhdeksänkymmenen minuutin mittausjakson aikana.

5.1.2 Paine-eron muutos -20...-30 Pa



Kuva 19. Kuvaajasta nähdään kaikkien ilmavuotokohtien pintalämpötilojen tasaantumisaika paine-eron muutoksen -20...-30 Pa jälkeen.

Ilmavuotokohta 1 pintalämpötiloissa ei näy merkittäviä muutoksia tässäkään painesuhteessa. Vaikka paine-eroa on lisätty, näkyy kuvaajasta selvästi, että rakenteessa ei vielääkään tapahdu jäähdyttävää ilmavirtausta.

Ilmavuotokohdan 2 pintalämpötiloissa näkyy pientä alenemista tässä painesuhteessa. Pintalämpötilan alenema on ainoastaan puoli astetta eli lämpötila on tasaantunut noin 13,5 °C:een lämpötilaan. Paine-eron lisääminen kymmenellä Pa:lla ei vaikuta merkittävästi rakenteen jäähdyttävään virtaukseen.

Ilmavuotokohdan 3 pintalämpötilat alenevat edelleen. Paine-eron lisäämisen jälkeen pintalämpötila putoaa vielä 12,0 °C:sta 9,9 °C:een. Tasaantumisaika on edelleen 50- 60 minuutin luokkaa.

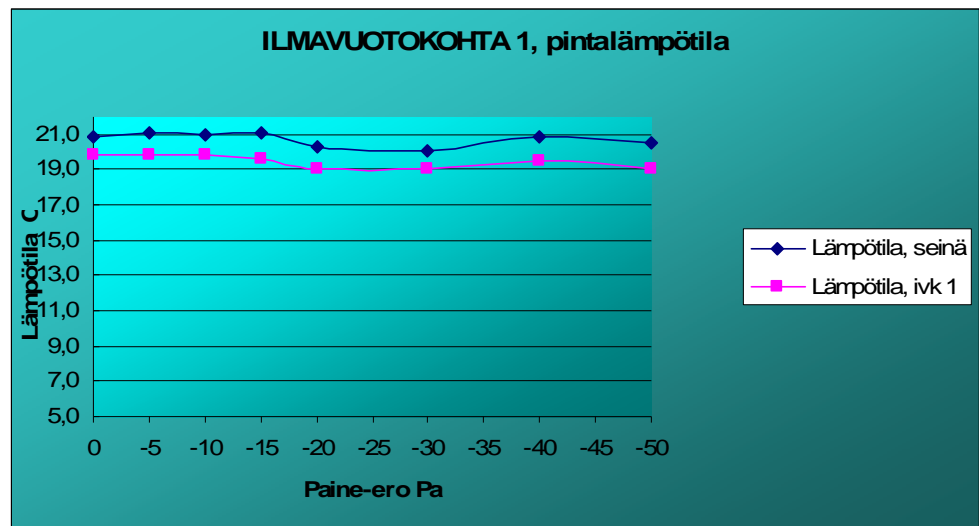
Ilmavuotokohdan 4 pintalämpötila alenee vielä hitaasti. Pintalämpötila laskee asteen verran 16,3 °C:sta 15,3 °C:een. Tasaantumisaika on edelleen tunnin luokkaa.

Ilmavuotokohdan 5 pintalämpötilat alenevat edelleen tässäkin painesuhteessa. Alenema on kuitenkin enää 7,5 °C:sta 5,6 °C:een. Tasaantumisaika on 30 minuuttia.

5.2 Pintalämpötilan muutokset eri painesuhteissa

Tekemämme tasaantumisaikatutkimuksen perusteella annoimme jokaisen paine-eron muutoksen jälkeen rakenteiden pintalämpötilojen tasaantua yhdeksänkymmenen minuutin ajan. Kaikki ilmavuotokohtat lämpökuvattiin tasaantumisaikana kymmenen minuutin välein. Jokaisesta ilmavuotokohtasta valittiin kussakin painesuhteessa se lämpökuva, joka antaa pienimmän (kylmimmän) lämpötila-arvon. Näiden arvojen perusteella tehtiin Excel-kuvaaja jokaisen ilmavuotokohtan pintalämpötilan kehittymisestä paine-eroissa. Näistä kuvista koottiin lämpökuvausraportti.

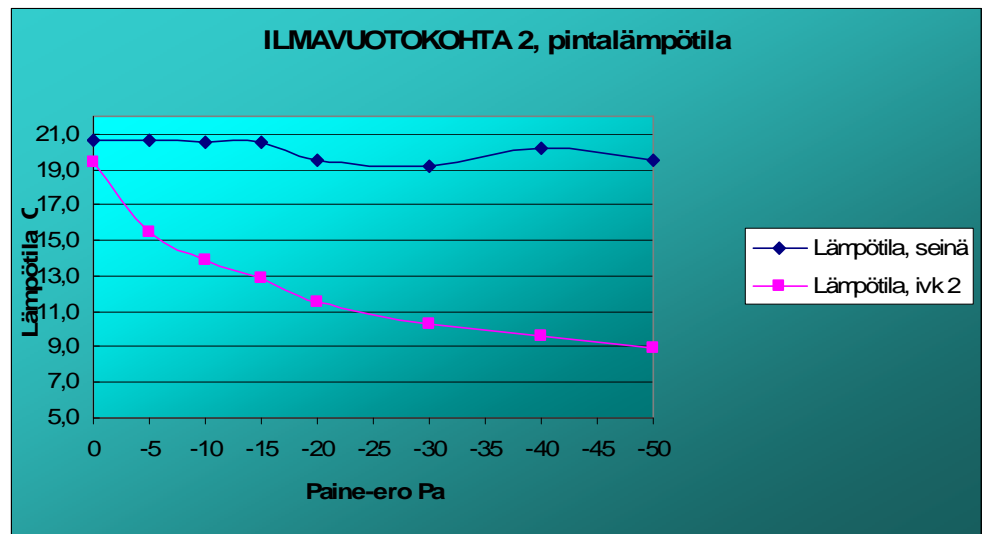
5.2.1 Ilmavuotokohta 1



Kuva 20. Kuvaajassa on esitetty rakenteen pintalämpötilat ja ilmavuotokohtan pintalämpötilat eri painesuhteissa.

Tämä ilmavuotokohta on toteutettu siten, että höyrysulkumuovin jatkos on jätetty teippaamatta 300 mm matkalta. Pintalämpötilakuvaajien perusteella voidaan todeta, että rakenteessa ei tapahdu jäähdyttävää ilmavirtausta. Rakenteen pintalämpötila ja ilmavuotokohtan pintalämpötila seuraavat tarkasti toisiaan. Ilmavuotokohtan pintalämpötilan muutos pysyy kaikissa painesuhteissa 1,5 °C sisällä.

5.2.2 Ilmavuotokohta 2

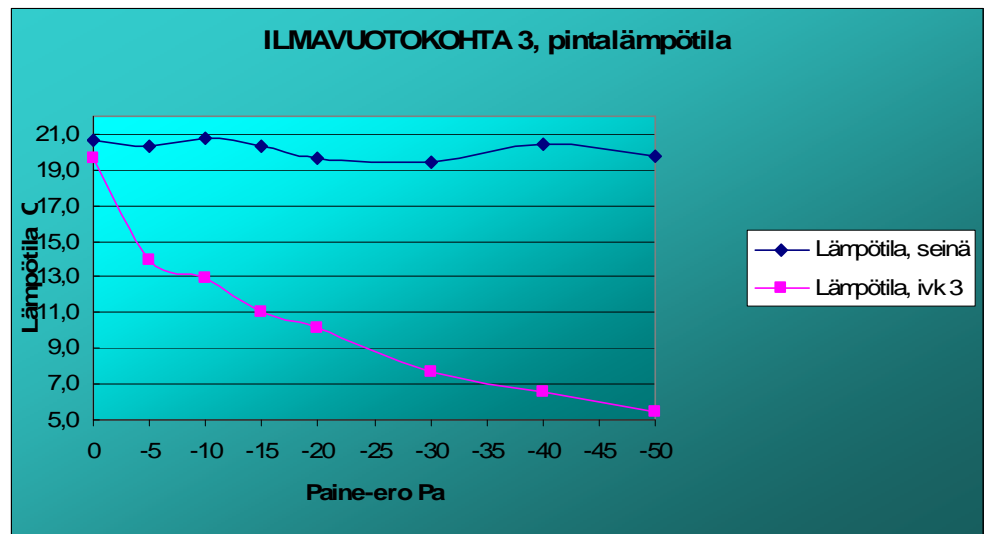


Kuva 21. Kuvaajassa näkyy rakenteen pintalämpötilan ja ilmavuotokohtan pintalämpötilan muutos eri painesuhteissa.

Tässä tutkittavassa ilmavuotokohdassa muovinen halkaisijaltaan 20 mm sähköputki lävistää höyrysulkumuovin ja pintamateriaalin. Höyrysulun lävistystä ei ole teipattu.

Lämpötila laskee aluksi melko nopeasti -20 Pa: in paine-eroon asti noin 8 °C. Tämän jälkeen paine-eron lisäyksellä ei ole niin suurta vaikutusta vaan lämpötilan putoaminen tasaantuu ja on -20...-50 Pa:in paine-eron muutoksen aikana enää noin 2,5 °C. Ilmavuotokohtan pintalämpötilan kokonaisaleneminen on 10,5 °C; 19,4 °C:sta 8,9 °C:een.

5.2.3 Ilmavuotokohta 3



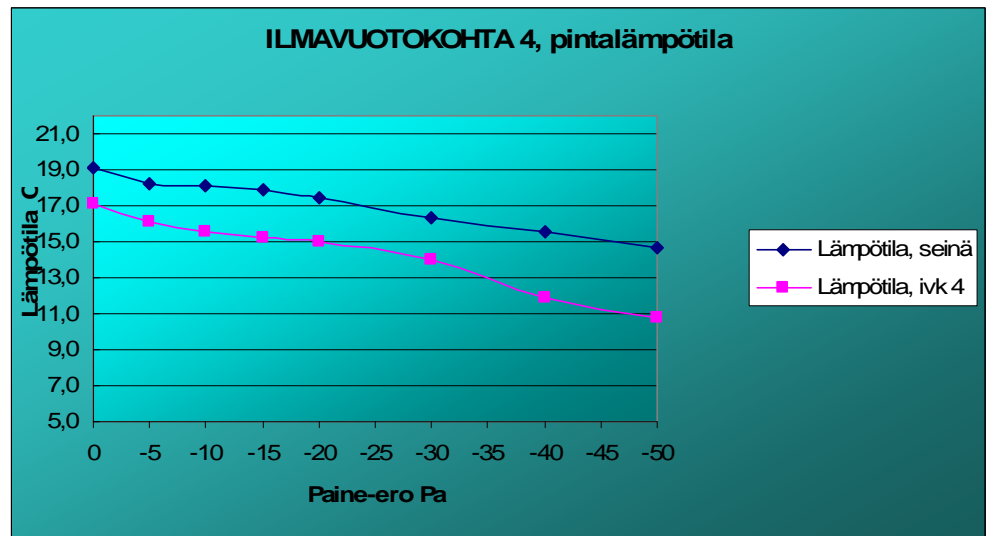
Kuva 22. Kuvaajasta näkyy rakenteen pintalämpötilan ja ilmavuotokohdan pintalämpötilan kehittyminen eri painesuhteissa.

Tässä ilmavuotokohdassa halkaisijaltaan 72 mm sähkörasia lävistää höyrysulkumuovin ja pintamateriaalin. Höyrysulkumuovi on jätetty teippaamatta.

Lämpötila putoaa nopeasti jo ensimmäisen tasaantumisjakson (0...-5 Pa) aikana 5,6 °C, ja alenee -20 Pa:iin mentäessä kaiken kaikkiaan 9,5 °C; 19,6 °C:sta 10,1 °C:een. Tämän jälkeen (-20...-50 Pa) lämpötilan aleneminen on huomattavasti hitaampaa ollen noin 2,5 °C. Ilmavuotokohdan lämpötilan kokonaisaleneminen on 14,2 °C; 19,6 °C:sta 5,4 °C:een.

Vaikka ilmavuoto on tyypiltään samanlainen kuin edellisessä kohdassa, muuttuu pintalämpötila varsinkin seurantajakson alussa (0...-5 Pa, 0...-20 Pa) nopeammin, myöskin loppulämpötila on alhaisempi. Tämä johtune siitä, että höyrysulkumuovissa ja pintamateriaalissa oleva reikä on suurempi.

5.2.4 Ilmavuotokohta 4

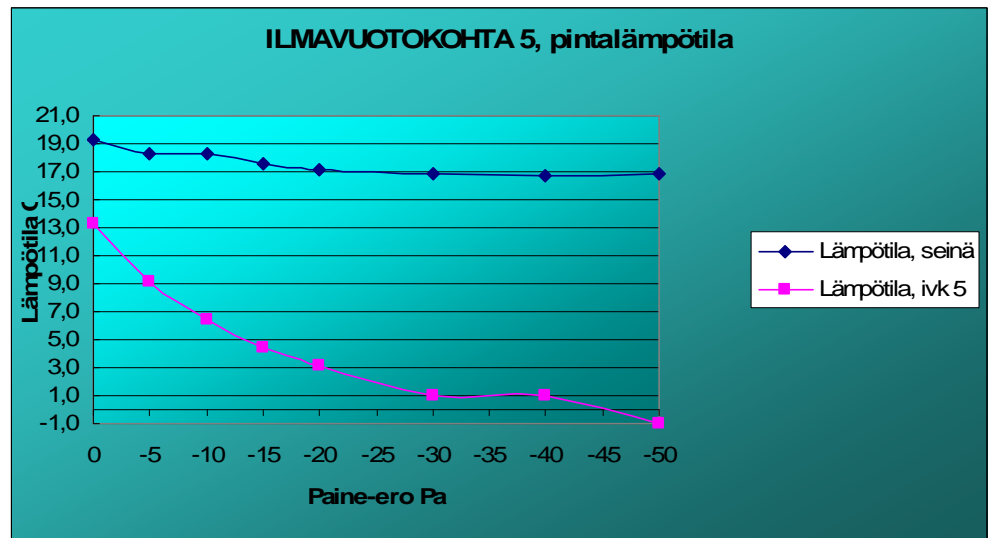


Kuva 23. Kuvaajasta nähdään yläpohjarakenteen ja ilmavuotokohdan pintalämpötilojen kehittyminen eri painesuhteissa.

Tämä ilmavuotokohta poikkeaa edellisistä siinä suhteessa, että höyrysulussa oleva viilto ei ole kosketuksissa pintamateriaalin kanssa. Pintamateriaalissa ei myöskään ole reikää. Tästä johtuen ilmavuotokohdasta virtaava jäähdyttävä kylmä ilma ei pääse suoraan sisäpinnan kanssa tekemisiin, vaan sisäpinta jäähtyy johtumalla.

Kuten kuvaajasta näkyy, myös rakenteen pintalämpötila, joka on mitattu samalta etäisyydeltä kuin edellisissä ilmavuotokohdissa, jäähtyy lähes samassa suhteessa ilmavuotokohdan kanssa. Ilmavuotokohdan lämpötila muuttuu tasaisesti koko testattavan paine-eron (0...-50 Pa) muutoksen ajan. Lämpötilan kokonaismuutos on 6,3 °C; 17,1 °C:sta 10,8 °C:een. Tämän tyyppinen ilmavuoto jäähdyttää rakennetta huomattavasti laajemmalla alueella kuin esimerkiksi ilmavuotokohtien 2 ja 3 tyyppiset pistemäiset ilmavuodot, jotka jatkuvat yhtenäisenä pintarakenteen läpi.

5.2.5 Ilmavuotokohta 5



Kuva 24. Kuvaajasta nähdään siporex-seinän pintalämpötilan ja ilmavuotokohdan pintalämpötilan muuttuminen eri paine-eroissa.

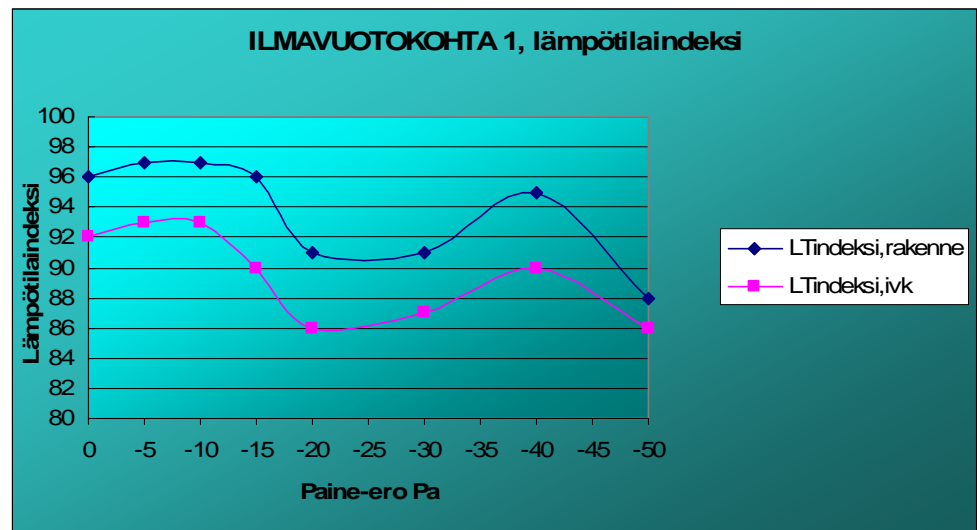
Tämä ilmavuotokohta on kahden rakenteen, puurakenteisen yläpohjan ja kivirakenteisen ulkoseinän, liittymäkohta. Kyseistä rakennetta on vaikea saada ilmatiiviiksi. Yläpohjasta tulevan höyrysulkumuovin liittäminen ilmatiiviisti siporex-seinään on erittäin hankalaa. Nyt tutkittavassa tapauksessa höyrysulkua ei ole viety siporex-seinään asti, vaan se on kiinnitetty yläsidepuun kylkeen. Yläsidepuun ja siporex-seinän liittymäkohta on jätetty teippaamatta.

Ilmavuotokohdan pintalämpötila on jo lähtötilanteessa (0 Pa) huomattavasti alhaisempi kuin muun rakenteen pintalämpötila. Koko paine-eron muutoksen ajan (0...-50 Pa) ilmavuotokohdan pintalämpötilan muutos on melko tasais-ta. Lämpötilan muutos on aluksi (0...-20 Pa) hieman nopeampaa 10,2 °C; 13,3 °C:sta 3,1 °C:een. Mentäessä suurempiin paine-eroihin (-20...-50 Pa) lämpötilan muutos kuitenkin tasaantuu ja on noin 4 °C; 3,1 °C:sta -1,0 °C:een. Kyseinen rakennusvirhe aiheuttaa erittäin alhaisen pintalämpötilan vuotokohdassa.

5.3 Ilmavuotokohtien vaikutus lämpötilaindeksiin

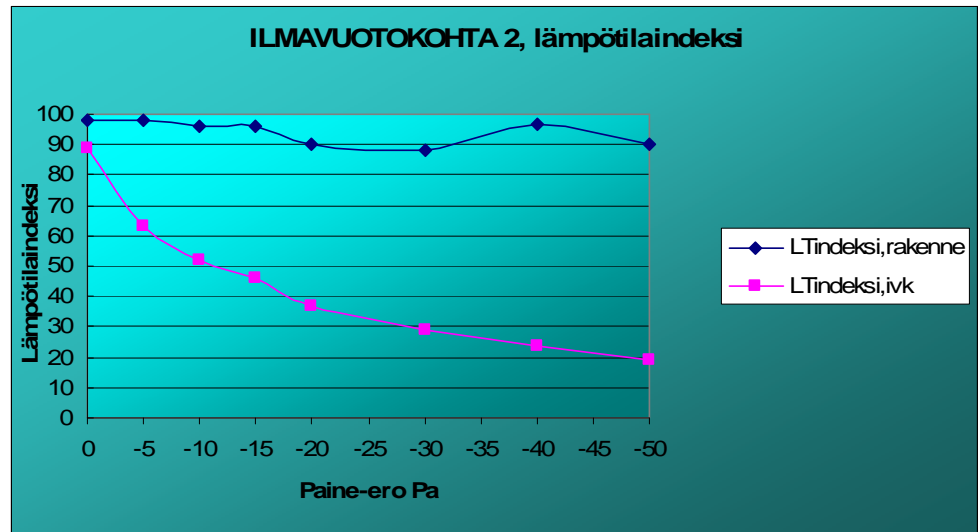
Lämpötilaindeksi, jota käsitellään luvussa 3.9.7, on työkalu jolla voidaan mitata rakenteen lämpöteknistä toimintaa.

5.3.1 Ilmavuotokohta 1, lämpötilaindeksi



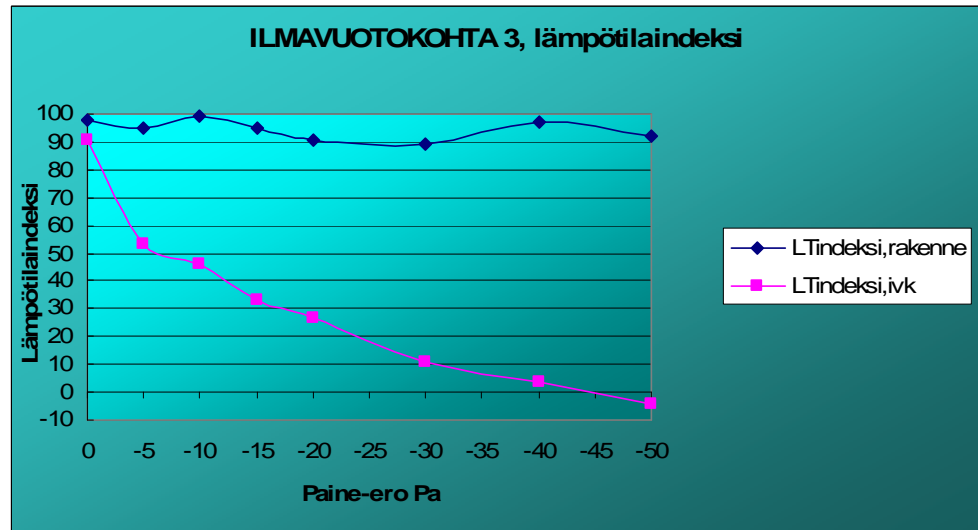
Lämpötilaindeksi TI on koko ajan suurempi kuin 70 %, joka on hyvän raja. Rakenteessa ei ole korjaustarvetta, vaikka tiedetään, että höyrysulkumuovi-en liitoskohta on jätetty osittain teippaamatta..

5.3.2 Ilmavuotokohta 2, lämpötilaindeksi



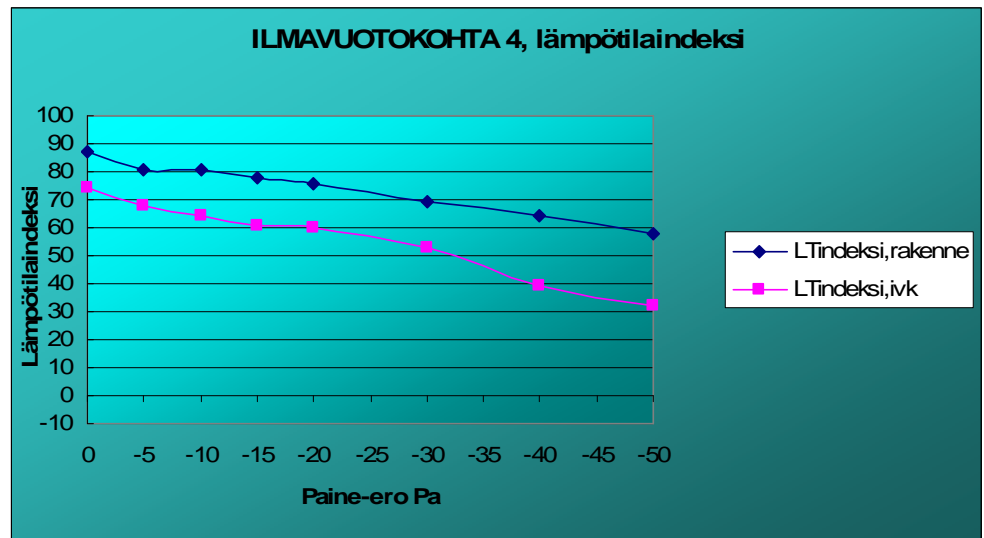
Ilmavuotokohdan lämpötilaindeksi putoaa jo -5 Pa alipaineessa alle hyvän 65 % tason ja heti -5 Pa jälkeen korjattavalle 60 % tasolle. Lähtötilanteessa lämpötilaindeksi on 89 %, mutta laskee -50 Pa alipaineessa 19 %:iin.

5.3.3 Ilmavuotokohta 3, lämpötilaindeksi



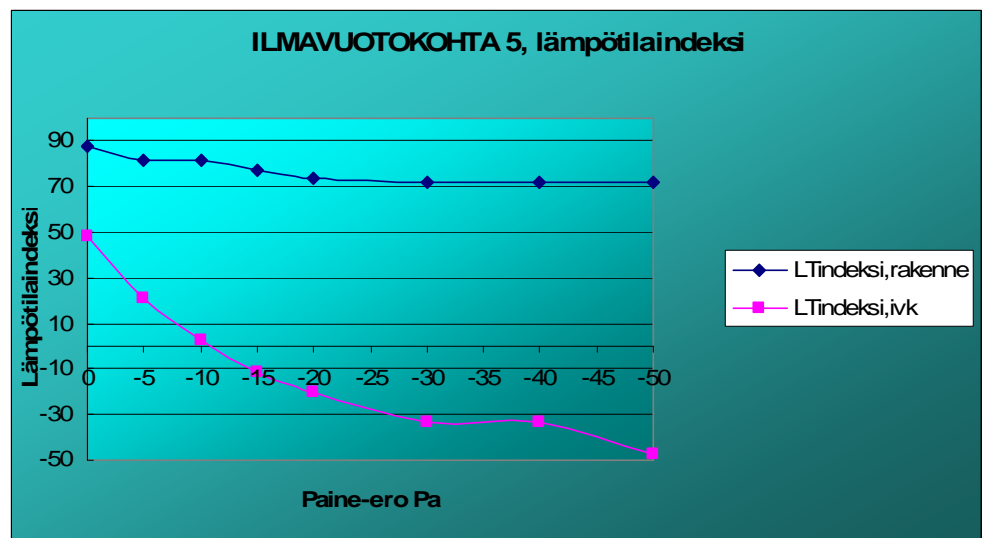
Ilmavuotokohdan lämpötilaindeksi putoaa jo ennen -5 Pa alipainetta alle korjattavan 60 % tason. Lähtötilanteessa (0 Pa) lämpötilaindeksi on 91 %, mutta laskee -50 Pa alipaineessa -4 %:iin.

5.3.4 Ilmavuotokohta 4, lämpötilaindeksi



Ilmavuotokohdan lämpötilaindeksi putoaa jo -5 Pa alipaineessa alle hyvän 65 % tason, mutta vasta -20 Pa jälkeen korjattavalle 60 % tasolle. Lähtötilanteessa (0 Pa) lämpötilaindeksi on 74 % ja laskee -50 Pa alipaineessa 32 %:iin. Kyseinen rakennusvirhe jäähdyttää myös ympäröivän rakenteen pintalämpötiloja huomattavasti, joten näidenkin lämpötilaindeksi alenee alle korjattavan 60 % tason.

5.3.5 Ilmavuotokohta 5, lämpötilaindeksi



Ilmavuotokohdan lämpötilaindeksi on jo alkutilanteessa (0 Pa) erittäin alhainen 48%. Lämpötilaindeksi laskee -50 Pa alipaineessa -47 %:iin. Tämä rakennusvirhe on erittäin yleinen ja kuten kuvaajasta on luettavissa, aiheuttaa myös erittäin suuren rakenteellisen ja terveydellisen riskin.

6 YHTEENVETO

Tutkimuksessa selvitettiin rakennuksessa olevien ilmavuotokohtien vaikutusta pintalämpötiloihin. Tutkittiin, miten tietyn kokoinen ja muotoinen ilmavuotokohta käyttäytyy erisuuruissa painesuhteissa. Selvitettiin, millaisella paine-erolla ilmavuotokohdan jäähdyttävä vaikutus pintalämpötilaan alkaa näkyä ja kuinka ilmavuotokohdan pintalämpötila käyttäytyy erisuuruissa paine-eroissa. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, voidaanko pintalämpötilojen muutoksista eri paine-eroissa tehdä päätelmiä ilmavuotokohdan ”suuruudesta”. Tutkimuksessa selvitettiin myös pintalämpötilojen tasaantumisaikaa paine-eron muutoksen jälkeen.

Tutkimus suoritettiin tutustumalla ensin rakennusfysiikan ja lämpökuvauksen kirjalliseen aineistoon, rakennusten ilmatiiviydestä aiemmin tehtyihin tutkimuksiin sekä rakentamismääräyksiin ja ohjeisiin. Kenttätutkimusta varten vuokrattiin testaustila TKK:n LVI-tekniikan laboratoriosta, joka mahdollisti stabiilit olosuhteet.

Tilaan rakennettiin tutkittava seinärakenne (13 mm sisäverhouskipsilevy, höyrysulkumuovi, 200 mm mineraalivillaeriste, 9 mm tuulensuojakipsilevy). Seinän höyrysulkuun tehtiin hallitusti kaksi samantyyppistä, mutta erikokoista ilmavuotokohtaa. Ilmavuotokohdat toteutettiin sähkörasian (ilmavuotokohta 3) ja sähköputken (ilmavuotokohta 2) lävistäessä höyrysulkumuovin. Tämän lisäksi tehtiin höyrysulun jatkokseen ilmavuotokohta (ilmavuotokohta 1).

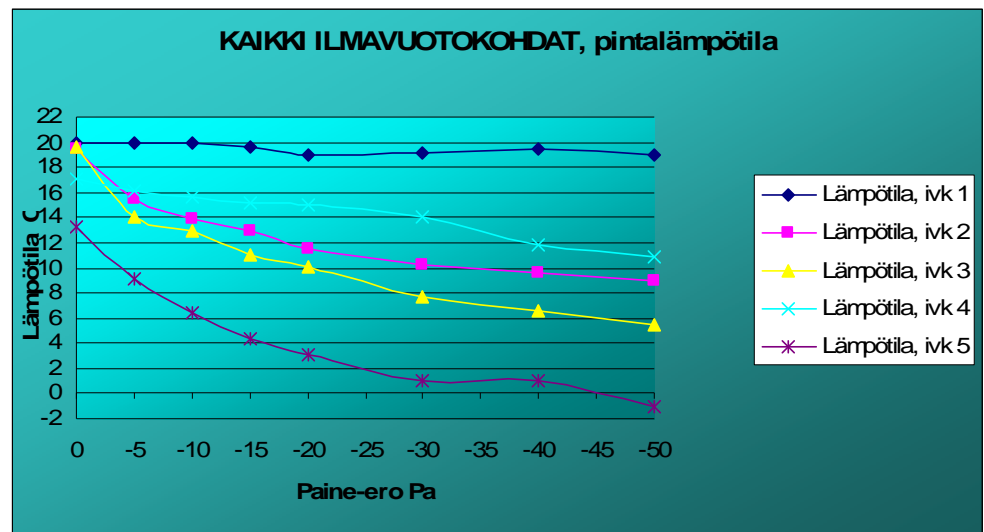
Näiden lisäksi tehtiin jo tutkimustilassa olevaan yläpohjarakenteeseen yläpohjan höyrysulkumuoviin 200 mm pituinen viilto (ilmavuotokohta 4) sekä tutkittiin siporex-seinän ja puurakenteisen yläpohjan liitoksen ilmavuotokohtaa (ilmavuotokohta 5).

Rakenteen molemmilla puolilla vakioitiin lämpöolosuhteet (sisällä 21 °C ja ulkona -8,5 °C.). Ilmavuotokohdan lämpötilaa mitattiin lämpökameralla eri paine-eroissa (0 Pa, -5 Pa, -10 Pa, -15 Pa, -20 Pa, -30 Pa, -40 Pa ja -50 Pa). Tietty paine-ero pidettiin yllä 90 minuuttia. Mittaustuloksista piirrettiin vuotokäyrästä (lämpötila paine-eron funktiona).

Kaikista ilmavuotokohdista saatiin erilainen ilmavuotokäyrä. Samantyyppisten ilmavuotokohtien, lähinnä ilmavuotokohdat 2 ja 3, ilmavuotokäyrissä on

havaittavissa yhtenäisyyksiä. Tuloksia vertailemalla huomataan, että ilma-
vuotoreiän pinta-ala vaikuttaa pintalämpötilan jäähtymisnopeuteen varsinkin
pienemmissä paine-eroissa.

Lämpötilaindeksin ja paine-eron suhde ei ole suoraan verrannollinen. Pie-
nemmissä paine-eroissa indeksi muuttuu nopeasti ja suuremmissa taas hi-
taammin. Indeksien muutos noudattaa pintalämpötilan muutosta. Tämän tut-
kimuksen perusteella lämpötilaindeksilaskentaan ei ole helposti saatavilla
paine-eron muutoksen huomioivaa matemaattista termiä.



Kuva 25. Kaikkien ilmavuotokohtien pintalämpötilakuvaajat.

Tutkimuksen tuloksista on havaittavissa, että jos höyryn- tai ilmansulku limi-
tetään, kuten rakentamismääräykset edellyttävät, runkotolpan yli, ei haitallis-
ta ilmavuotoa pääse syntymään vaikka osa saumasta olisi jäänyt teippaa-
matta (ilmavuotokohta 1).

Ilmavuodot, jotka lävistävät sekä höyrysulkumuovin että pintamateriaalin ja
ovat suorassa kosketuksessa sisäpuolen pintamateriaalin kanssa aiheutta-
vat merkittävää pintalämpötilan alenemista. Tämän tyyppisissä rakennusvir-
heissä pintalämpötilojen aleneminen on huomattavaa jo pienissä -5...-20 Pa
paine-eroissa. Tämän jälkeen paine-eron lisääminen ei vaikuta enää niin
merkittävästi ilmavuotokohtien pintalämpötiloihin (ilmavuotokohtat 2, 3 ja 5).
Samanmuotoisten mutta erisuuruisten ilmavuotojen välillä on havaittavissa
eroja. Suuremmat ilmavuodot jäähtyvät pintalämpötiloja hieman nopeammin
kuin pienet ilmavuodot (ilmavuotokohtat 2 ja 3).

Ilmavuodot, joissa höyrysulussa oleva ilmavuotokohta ei ole suorassa kosketuksessa pintamateriaalin kanssa, eikä pintamateriaalissa ole ilmavuodon kohdalla reikää, jäähtyvät huomattavasti hitaammin. Nämä rakennusvirheet ovat tyypillisiä yläpohjarakenteissa. Pintalämpötilan aleneminen alkaa näkyä jo pienimmissä paine-eroissa, ei tosin niin selvästi kuin edellisissä ilmavuotokohdissa, ja laskee lineaarisesti kaikissa tutkittavissa paine-eroissa. Tämän tyyppisessä ilmavuodossa ilmavirran jäähdyttävä vaikutus ei pääse jäähdyttämään itse sisäpintaa, vaan sisäpinnan jäähtyminen tapahtuu joltumalla pintamateriaalin läpi (ilmavuotokohta 4).

Tutkimustulosten perusteella lämpökuvauksissa yleisesti käytetty tasaantumisaika, 30 minuuttia paine-eron muutoksen jälkeen, on liian lyhyt. Tämän tutkimuksen tulosten valossa olisi suositeltavaa käyttää pidempää, mielellään vähintään tunnin tasaantumisaikaa.

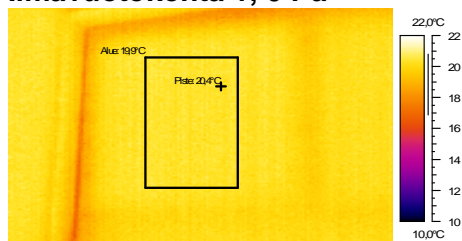
Tutkimuksen tuloksista voidaan havaita, että ilmatiiviiden merkitys rakennuksen vaipan pintalämpötilojen kannalta on erittäin suuri. Tutkittavat rakenteet olivat erittäin hyvin lämpöeristettyjä, mutta siitä huolimatta ilmavuotokohden pintalämpötilat laskivat hyvin alhaisiksi. Tämä on erittäin merkittävä asia nyt, kun rakennusten energiatalouteen on alettu kiinnittämään aiempaa suurempaa huomiota. Vaipan tiiviydellä on ratkaisevan suuri merkitys rakennuksen energiatalouteen.

VIITELUETTELO

- [1] Rakennuksen lämpökuvaus, Suunnitteluohje 1213-S Ratu, kesäkuu 2005.
- [2] Pekkonen, Juhani: Helsingin ammattikorkeakoulu, Luentomateriaali, 2007.
- [3] Paloniitty Sauli, Kauppinen Timo: Rakennusten lämpökuvaus, Rakennusteollisuuden Kustannus RTK Oy, Jyväskylä 2006.
- [4] Suomen rakentamismääräyskokoelma: D2 Rakennuksen sisäilmasto ja ilmanvaihto, 2003.
- [5] Suomen rakentamismääräyskokoelma: C2 Kosteus, 2003.
- [6] Suomen rakentamismääräyskokoelma: C3 Rakennuksen lämmöneristys, 2007.
- [7] SFS 5511 standardi: Ilmastointi, rakennusten sisäilmasto, lämpötilojen kenttämittaukset, 1989.
- [8] Asumisterveysohje: Sosiaali- ja terveysministeriö, Helsinki 2003.
- [9] Wikipedia. <http://fi.wikipedia.org/wiki/Vesih%C3%B6yry>. Luettu 16.1.2008.
- [10] Wikipedia. http://fi.wikipedia.org/wiki/Hengitt%C3%A4v%C3%A4_rakenne#Hygrokoopipiset_materiaalit. Luettu 18.1.2008.
- [11] Vakka-kaasu. <http://www.vakka-kaasu.fi/>. Luettu 18.1.2008.
- [12] Hämeen ammattikorkeakoulu, kurssimateriaali lämpökuvauspäivät, maaliskuu 2006.
- [13] Siikanen, Unto: Rakennusfysiikka, Rakennustieto Oy, Helsinki 1996.
- [14] Wikipedia. <http://fi.wikipedia.org/wiki/Ilmansulku#Ilmanvuotoluku>. Luettu 22.1.2008.
- [15] Meltex. <http://www.meltex.fi/muovikalvot.htm>. Luettu 31.1.2008.
- [16] Kalamees, Targo: Teknillinen korkeakoulu, LVI- tekniikan laboratorio, tutkimusmateriaali, 2007.
- [17] Korpi, M., Vinha, J. ja Kurnitski J. (2007). Pientalojen ja kerrostaloasuntojen ilmanpitävyys. Rakennusfysiikka 2007. Seminaarijulkaisu 1. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikan laitos. s. 253 - 260.
- [18] Tampereen tekninen yliopisto http://www.tut.fi/units/rka/rtek/tutkimus/rakennusfysiikka/Pientalojen_ja_kerrostaloasuntojen_ilmanpitavyys.pdf. Luettu 3.3.2008.

Tutkimuksessa olleiden ilmavuotokohtien keskeiset mittaustulokset ja lämpökuvat 0 ja -50 Pa:n paine-eroissa.

Ilmavuotokohta 1, 0 Pa



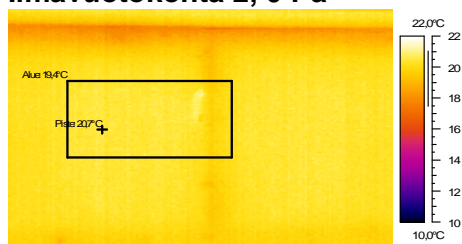
Mittausalue min 19,9° C
Mittausalue max 20,9° C
Lämpötilaindeksi 86 %

Ilmavuotokohta1, - 50 Pa



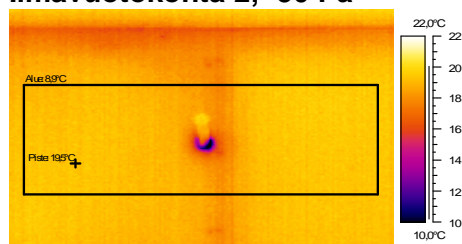
Mittausalue min 19,0° C
Mittausalue max 20,2° C
Lämpötilaindeksi 86 %

Ilmavuotokohta 2, 0 Pa



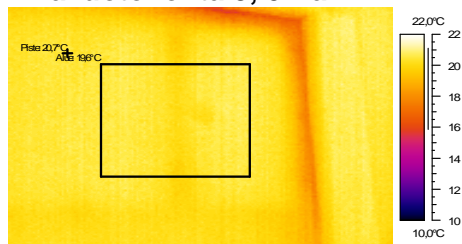
Mittausalue min 19,4° C
Mittausalue max 21,3° C
Lämpötilaindeksi 89 %

Ilmavuotokohta 2, -50 Pa



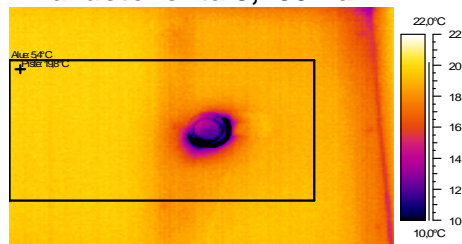
Mittausalue min 8,9° C
Mittausalue max 20,1° C
Lämpötilaindeksi 19 %

Ilmavuotokohta 3, 0 Pa

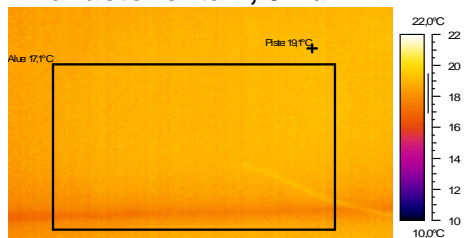


Mittausalue min 19,6° C
Mittausalue max 21,1° C
Lämpötilaindeksi 89 %

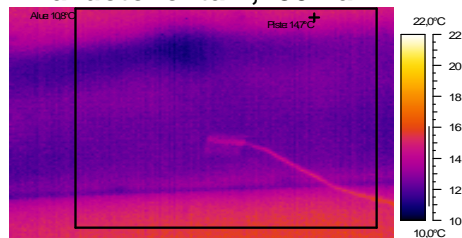
Ilmavuotokohta 3, -50 Pa



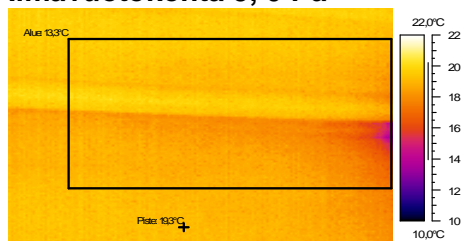
Mittausalue min 5,4° C
Mittausalue max 20,2° C
Lämpötilaindeksi - 4 %

Ilmavuotokohta 4, 0 Pa


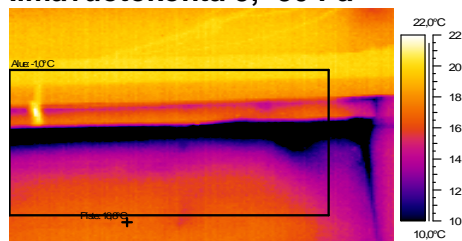
Mittausalue min 17,1°C
Mittausalue max 19,5°C
Lämpötilaindeksi 74 %

Ilmavuotokohta 4, -50 Pa


Mittausalue min 10,8°C
Mittausalue max 16,0°C
Lämpötilaindeksi 32 %

Ilmavuotokohta 5, 0 Pa


Mittausalue min 13,3°C
Mittausalue max 22,3°C
Lämpötilaindeksi 48 %

Ilmavuotokohta 5, -50 Pa


Mittausalue min -1,0°C
Mittausalue max 20,5°C
Lämpötilaindeksi -47 %